

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Ondřej ŠÁROVEC

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

**TEPLOTA TERMICKÉ MODIFIKACE DŘEVA
A JEJÍ DOPAD NA CHEMICKÉ ZMĚNY V JEHO
STRUKTUŘE V INTERAKCI NA VYBRANÉ
FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:	Dřevařství
Pracoviště:	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Vedoucí práce:	doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Konzultant práce:	Ing. Petr Paul

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Ondřej Šárovec

Dřevařství
Dřevařství

Název práce

Teplota termické modifikace dřeva a její dopad na chemické změny v jeho struktuře v interakci na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti

Název anglicky

Temperature of thermal modification of wood and its impact on chemical changes in its structure in interaction with selected physical and mechanical properties

Cíle práce

Cílem práce je zesumarizovat poznatky se zaměřením na dané téma. Následně experimentálním způsobem zjistit vliv jednotlivých stupňů teploty termické úpravy na vybrané dřeviny, na vybrané fyzikální a mechanické charakteristiky. Předpokládaným výstupem práce by mělo být zhodnocení účinku termické modifikace na sledované charakteristiky.

Metodika

1. Úvod (říjen 2020).
2. Analýza problematiky (listopad 2020).
3. Experimentální část (listopad 2020).
4. Měření (prosinec 2020).
5. Vyhodnocení (leden 2021).
6. Přínosy a doporučení (únor 2021).
7. Závěr (březen 2021).

Doporučený rozsah práce

80 stran

Klíčová slova

Termická úprava, tropická dřevina, teplota tepelné úpravy, thermo wood

Doporučené zdroje informací

- Boonstra, M. J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B. F., and Kegel, E. V. (2007). "Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents," *Annals of Forest Science* 64(7), 679-690. DOI: 10.1051/forest: 2007048.
- Kacikova, D., Kacik, F., Cabalova, I., and Durkovic, J. (2013). "Effects of thermal treatment on chemical, mechanical, and colour traits in Norway spruce wood," *Bioresource Technology* 144, 669. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.110
- Martinka, J., Chrebet, T., Král, J., and Balog, K. (2013a). "An examination of the behaviour of thermally treated spruce wood under fire conditions," *Wood Research* 58(4), 599-606.
- REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ Z.; 2008. *Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikace*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.
- Seifert, K., 1960. Zur Frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylacetone-Methode. *Das Papier* 14, 104-106.
- Tewarson, A. (1994). "Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation," *Journal of Fire Sciences* 12(4), 329-356. DOI: 10.1177/
- Wise, L.E., Murphy, M., D'Addieco, A.A., 1946. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses. *Paper Trade J.* 122, 35-43.
- Xing, D., and Li, J. (2014). "Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of Larix spp. wood," *BioResources* 9(3), 4274-4287. DOI: 10.15376/biores.9.3.4274-428
- Yinodotlgor, N., and Kartal, S. N. (2010). "Heat modification of wood: Chemical properties and resistance to mold and decay fungi," *Forest Products Journal* 60(4), 357-361.
-

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 14. 7. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 20. 04. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „**Teplota termické modifikace dřeva a její dopad na chemické změny v jeho struktuře v interakci na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti**“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V dne.....

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD, za vedení při zpracování práce a za čas který mi věnoval. Také děkuji rodině a přátelům, za jejich podporu a motivaci v mém studiu. Poděkování patří také konzultantovi Ing. Petru Paulovi, za jeho trpělivost a rady pro úspěšné vypracování práce.

Abstrakt ve státním jazyce

Tato práce se zabývá dopadem a posouzením vlivu jednotlivých stupňů teploty termické úpravy na chemické změny ve dřevě mahagonu (*Swietenia mahagoni*), v interakci na zkoumané fyzikální a mechanické vlastnosti. Konkrétně se jedná o experimentální měření změn barevného prostoru, pomocí spektrofotometru Konica Monolta CM-600d, tvrdosti podle Brinella, pomocí tvrdoměru DuraVision 30 a rázové houževnatosti, testované na Instronu MPX. Všechny zkoušky a zkušební tělesa podléhají předepsaným normám.

Po vykonání chemické analýzy a vyhodnocení výsledků, byl zjištěn statisticky velmi významný vliv termické úpravy na změnu procentuálního zastoupení všech chemických komponentů. Z výsledků vyplývá, že tyto změny významně ovlivnily všechny sledované charakteristiky. K nejvýznamnějším změnám fyzikálních a mechanických vlastností, dochází při termické úpravě teplotou 210 °C (barva a tvrdost) a teplotou 180 °C (rázová houževnatost).

Klíčová slova

Termická úprava, tropická dřevina, teplota tepelné úpravy, thermowood

Abstract

This bachelor thesis concerns the effects of each levels of thermal treatment on chemical changes in wood mahogany (*Swietenia mahagoni*) in interaction on examined physical and mechanical properties. Specifically experimental measurement of colour space change with spectrophotometer Konica Monolta CM-600d, Brinell hardness test with hardness tester DuraVision 30 and toughness tested with Instron MPX. All tests and test specimens are subject to the prescribed standards.

After the conclusion of the chemical analysis and result evaluation, a statistically very important effect of thermal treatment on change in percentage of all chemical components was observed. The results show that these changes greatly affected all measured characteristics. The most important changes of physical and mechanical properties are observed with the thermal change by temperature of 210 °C (colour and hardness) and 180 °C (toughness).

Keywords

Thermal treatment, tropical tree, heat treatment temperature, thermo wood

Obsah

Seznam ilustrací	10
Seznam tabulek	12
Seznam zkratk a značek	13
Slovník termínů.....	14
Úvod	15
1 Cíl práce	16
2 Způsoby modifikace dřeva	17
2.1 Chemická modifikace	17
2.2 Mechanická modifikace.....	17
2.3 Hydrotermická modifikace	18
2.4 Biologická modifikace.....	19
3 Termická modifikace	20
3.1 Historie a vývoj termické modifikace dřeva	21
3.2 Vliv teploty na dřevo	23
3.3 Základní způsoby termické modifikace.....	24
3.3.1 ThermoWood®	25
3.3.2 RetificatedWood	27
3.3.3 Plato®Wood.....	28
3.3.4 OHT-Wood, RoyalWood.....	29
3.4 Trvanlivost termicky upraveného dřeva	29
3.4.1 Odolnost vůči biologickým škůdcům	30
3.4.2 Odolnost vůči atmosférické degradaci.....	31
3.4.3 Protipožární odolnost	32
3.5 Obrábění termicky modifikovaného dřeva	32
3.6 Využití termodřeva	32
4 Změny ve struktuře a vlastnostech termicky upraveného dřeva.....	36
4.1 Změny v chemické struktuře	36
4.1.1 Celulóza	36
4.1.2 Hemicelulóza	37
4.1.3 Lignin.....	37
4.1.4 Extraktivní látky.....	38
4.2 Změny fyzikálních vlastností	38

4.2.1	Barva a vůně	38
4.3	Změny mechanických vlastností	39
4.3.1	Tvrдость	39
4.3.2	Houževnatost.....	40
5	Metodika měření	41
5.1	Příprava zkušebních těles	42
5.1.1	Termická úprava pro experiment změny barvy	42
5.1.2	Termická úprava pro experiment změny tvrdosti	44
5.1.3	Termická úprava pro experiment změny rázové houževnatosti	44
5.2	Značení zkušebních těles	44
5.2.1	Označení zkušebních těles pro experiment barevné změny	44
5.2.2	Označení zkušebních těles pro experiment změny tvrdosti.....	45
5.2.3	Označení zkušebních těles pro experiment změny rázové houževnatosti.....	45
5.3	Experimentální měření	45
5.3.1	Měření účinku termické úpravy na barevné změny	45
5.3.2	Měření účinku termické úpravy na tvrdost	47
5.3.3	Měření účinku termické úpravy na rázovou houževnatost	48
5.4	Chemická analýza.....	50
5.5	Vyhodnocování naměřených dat	50
6	Výsledky a vyhodnocení	52
6.1	Vliv termické úpravy na změny v chemickém složení.....	52
6.2	Vliv termické úpravy na barevné změny	55
6.3	Vliv termické úpravy na změnu tvrdosti	58
6.3.1	Vliv termické úpravy na změnu rázové houževnatosti	60
	Závěr	64
	Seznam použité literatury	67

Seznam ilustrací

Obr. 1. Podélně stlačované dřevo – studené ohýbání	18
Obr. 2. Zastoupení výroby termicky upraveného dřeva v letech 2001–2019.....	22
Obr. 3. Objemový nárůst výroby termicky upraveného dřeva v letech 2001–2019.....	22
Obr. 4. Zastoupení dřevin ve výrobě termicky upraveného dřeva v letech 2001–2019.	25
Obr. 5. Zastoupení tříd S a D u výrobků značky ThermoWood® v letech 2001-2.....	26
Obr. 6. Schéma výroby ThermoWoodu®	27
Obr. 7. Zastoupení základních a ostatních výrobků u termicky upraveného dřeva.....	33
Obr. 8. Možnosti využití pro Thermo S a Thermo D	34
Obr. 9. Využití termicky upraveného dřeva v exteriéru	34
Obr. 10. Využití termicky upraveného dřeva v interiéru – sauna.....	35
Obr. 11. Využití termicky upraveného dřeva v interiéru – mobilní dům	35
Obr. 12. Vliv stupňů termické úpravy na barvu dřeva dubu.....	39
Obr. 13. Znázornění vztahu mezi tvrdostí podle Brinella a teplotou termické modifikace, která probíhala 3 hodiny	40
Obr. 14. Zkušební těleso pro posouzení barevné změny v důsledku termické úpravy...	42
Obr. 15. Znázornění průběhu jednotlivých stupňů termické úpravy vzorků mahagonu	43
Obr. 16. Zkušební těleso pro experiment změny houževnatosti v důsledku termické úpravy	44
Obr. 17. Znázornění barevného prostoru pro metodu CIE L*a*b*	46
Obr. 18. Měření tvrdost podle Brinella.....	47
Obr. 19. Instron MPX pro měření rázové houževnatosti	49
Obr. 20. Změna % zastoupení extraktivních látek v závislosti na	54
Obr. 21. Změna % zastoupení.....	54
Obr. 22. Změna % zastoupení holocelulózy v závislosti na termické úpravě	54
Obr. 23. Změna % zastoupení celulózy v závislosti na termické úpravě	54
Obr. 24. Změna % zastoupení hemicelulózy	54
Obr. 25. Vliv teploty termické modifikace na parametr ΔE^*	55
Obr. 26. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením extraktivních látek	57
Obr. 27. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením ligninu.....	57
Obr. 28. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením celulózy.....	57
Obr. 29. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením hemicelulózy.....	57
Obr. 30. Korelace mezi celkovou změnou.....	57
Obr. 31. Vliv teploty termické modifikace na tvrdost	58
Obr. 32. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením extraktivních látek.....	59

Obr. 33. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením ligninu	59
Obr. 34. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením holocelulóz.....	60
Obr. 35. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením celulózy.....	60
Obr. 36. Korelace mezi tvrdostí.....	60
Obr. 37. Vliv teploty termické modifikace na parametr houževnatost.....	61
Obr. 38. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením extraktivních látek...	62
Obr. 39. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením ligninu	62
Obr. 40. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením holocelulózy	62
Obr. 41. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením celulózy.....	62
Obr. 42. Korelace mezi rázovou houževnatostí.....	63

Seznam tabulek

Tab. 1. Vstupní technologické parametry a doba termické úpravy vzorků mahagonu (Zdroj: vlastní tvorba).....	43
Tab. 2. Přehled hodnot parametru ΔE^* a jeho dopad na změnu barvy.....	46
Tab. 3. Průměrné hodnoty chemického složení dřeva mahagonu u jednotlivých stupňů termické úpravy.....	52
Tab. 4. Jedno faktorova analýza rozptylu hodnotící účinek teploty na hodnoty změn chemických komponentů	52
Tab. 5. Naměřené hodnoty L^* , a^* a b^* pro jednotlivé teploty termické úpravy	55
Tab. 6. Statistická významnost vlivu termické modifikace na parametr ΔE^*	55
Tab. 7. Statistická významnost vlivu teploty termické modifikace na parametr ΔE^*	56
Tab. 8. Statistická významnost vlivu termické modifikace na parametr tvrdosti.....	58
Tab. 9. Statistická významnost vlivu teploty termické modifikace na parametr tvrdosti	59
Tab. 10. Statistická významnost vlivu termické modifikace na parametr houževnatosti	60
Tab. 11 .Statistická významnost vlivu teploty termické modifikace na parametr rázové houževnatosti.....	61

Seznam zkratek a značek

např. – například	MPX – megapixel
kol. – kolektiv	CIE L*a*b* – barevné prostory
tzn. – to znamená	h – tloušťka
apod. – a podobně	š – šířka
atd. – a tak dále	l – délka
cca – přibližně	°C – stupeň celsia
tj. – to je	C – uhlík
Obr. – Obrázek	MPa – megapascal
Tab. – tabulka	W _{min} – minimální vlhkost
TM – termická modifikace	kg – kilogram
MH – mahagon	g – gram
UV – ultrafialové záření	cm – centimetr
OH – hydroxylová skupina	cm ² – centimetr čtvereční
VTT – Technické výzkumné centrum Finska	m – metr
PLATO – Providing Lasting Advanced Timber Option	m ³ – metr kubický
OHT – Oil Heat Treatment	F – síla působící na kuličku
DTD – dřevotřísková deska	N – newton – jednotka síly
OSB – Oriented Strand Board	% – procento
ISO – International Organization for Standardization	r – koeficient korelace
	r ² – koeficient determinace

Slovník termínů

Modifikace je úprava materiálu, za účelem změny námi sledovaných vlastností.

Termická úprava je proces, jehož podstatou je zahřívání daného materiálu, za spolupůsobení vzduchu, vodní páry, oleje či jiných látek, za účelem změny jeho vlastností.

Termování je synonymum ke slovu termická úprava.

Termolýza je tepelné štěpení organických látek na jednodušší sloučeniny.

Tvrдост je schopnost materiálu odolávat proti vniknutí cizích těles.

Houževnatost je schopnost materiálu odolávat vzniku a šíření trhlin v důsledku nárazu.

Analýza je rozbor dané problematiky, jehož cílem je popsání a rozdělení základních informací na dané téma, nutných pro její pochopení.

Experiment je metoda výzkumu nebo ověření na základě jednoho či více pokusů.

Difuze je pohyb částic vyvolaný gradientem (rozdílnými hodnotami) mezi dvěma prostředími.

Interiér je vnitřní prostor, chráněný před některými vlivy atmosférického působení.

Exteriér je vnější prostor, jedná se o opak interiéru.

Smolník je pryskyřičná kapsa ve struktuře dřeva, vzniklá vyplněním dutiny pryskyřicí.

Intarzie je ozdobné vykládání nábytku dřevem o různé barvě za účelem dekorace.

Úvod

Dřevo je materiál, který nás provází každým krokem. Ať už v podobě nábytku, papíru, dekoračních prvků, paliva či v podobě stromu. Jeho využití je v mnohém nenahraditelné a neustále nabývá na významu. Je to dáno zejména jeho naturálností, snadným opracováním, dostupností a širokým využitím. V současné době se upouští od jeho využití pro získání energie a je stále častěji využíváno smysluplnějším a šetrnějším způsobem: výroba dřevěných konstrukcí, aglomerovaných materiálů, interiérového a exteriérového nábytku.

Stále častěji kladenou otázkou je, jak zvýšit jeho přirozenou trvanlivost, a tedy prodloužit jeho životnost. Z tohoto důvodu se začalo využívat různých typů modifikace dřeva. Jedná se ale často o ekologicky nepříznivé způsoby jeho ochrany. V důsledku toho byla vyvinuta termická modifikace, která zajišťuje ekologičtější ochranu dřeva. Tato modifikace je dnes již poměrně dobře probádaná, díky čemuž se výzkum stále více zaměřuje na tropické dřeviny, jejichž reakce na zvyšující se teplotu tolik neznáme.

Z tohoto důvodu jsme pro náš výzkum vybrali tropické dřevo mahagonu (*Swietenia mahagoni*), jehož vlastnosti po termické úpravě nejsou tolik prozkoumané. Významně tím přispějeme k osvětlení této problematiky a získáme důležité informace o dalším dřevě. Tyto informace mohou být zlomem ve vnímání uplatnění této dřeviny.

Pro snazší pochopení problematiky, je v práci přiblížena samotná termická modifikace, její průběh a dopad na změny v chemické struktuře dřeva a sledované fyzikální a mechanické vlastnosti. Praktická část je zaměřena na experimentální měření a následné získání výsledků z naměřených dat. Konkrétně se jedná o pozorování změn v jeho chemické struktuře, a vlivu těchto změn na barvu, tvrdost a houževnatost.

1 Cíl práce

Cílem práce je sumarizovat poznatky se zaměřením na dané téma. Následně experimentálním způsobem zjistit vliv rozdílných teplot termické úpravy zvolené dřeviny na vybrané fyzikální a mechanické charakteristiky. Předpokládaným výstupem práce by mělo být zhodnocení účinku termické modifikace na sledované charakteristiky.

Hlavní cíle této práce jsou:

1. Zjistit účinek teploty termické modifikace na změny základních chemických komponentů (celulóza, lignin, hemicelulóza, holocelulóza, extraktivní látky).
2. Zjistit vliv změny v zastoupení chemických komponentů na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti (barva, tvrdost, rázová houževnatost).

Pro naplnění uvedených cílů bylo nutné stanovit několik částečných cílů:

1. Analýza literárních poznatků k dané problematice.
2. Termická modifikace dřeva Mahagonu (*Swietenia mahagoni*), za účelem změny jeho charakteristik.
3. Experimentální měření jeho sledovaných charakteristik pro jednotlivé stupně termické úpravy.
4. Analýza změn chemických komponentů.
5. Zpracování výsledků z chemické analýzy a experimentálních měření v softwaru Statistica 12.

2 Způsoby modifikace dřeva

Dřevo jako materiál využívaný pro širokou škálu výrobků, vykazuje v některých ohledech i své nedostatky. Z tohoto důvodu se začali vymýšlet nejrůznější způsoby modifikace dřeva, aby se některé z nich snížili či skoro úplně eliminovali. Díky tomu můžeme dřevo používat i tam, kde to bylo předtím nemožné či nevýhodné.

Mezi základní modifikační metody patří: chemická, mechanická, enzymatická, impregnační, hydrotermická, povrchová a námi rozebíraná termická modifikace (Kap. 3).

Hlavním cílem modifikací je změnit strukturu dřeva, v důsledku čehož se mění i jeho vybrané vlastnosti, jako je např.: pevnost, tvrdost, hydrofobičnost, termická odolnost, rozměrová stabilita, barevná stálost atd. Obecně během modifikace usilujeme o zlepšení jeho trvanlivosti a dalších námi vybraných charakteristik, při zachování jeho ostatních vlastností (Reinprecht a vidholdová, 2008).

2.1 Chemická modifikace

Její podstatou je působení a reakce chemických látek se složkami dřeva, přičemž dochází k vytvoření nové chemické vazby. Tyto látky nemají žádný fungicidní či jiný ochranný účinek a ve dřevě zůstávají buď v lumenech buněk nebo se dostávají i do jejich stěn, kde mohou chemicky reagovat s jednotlivými složkami dřeva. Nejvíce se používá například amoniak využívající se v nábytkářském průmyslu, jež zvyšuje hygroskopicitu dřeva anebo acetanhydrid, který zabezpečuje jeho rozměrovou stabilitu.

Pod chemickou modifikací spadá také impregnace, tedy vtlačování impregnační látky do dřeva za účelem zvýšení jeho hygroskopičnosti, trvanlivosti či rozměrové stálosti. Používají se například oleje či živice (Rowell, 1984; HILL, 2006).

2.2 Mechanická modifikace

Pokud se podíváme na dřevo z mikroskopické úrovně, můžeme spatřit nesčetné množství cév a cévic, které zajišťují pohyb vody a minerálních látek z kořenů do větví stromu. Dřevo jako takové je tedy, díky lumenům těchto buněk, pórovitý materiál, což umožňuje jeho mechanické slisování za pomoci působení vnějšího tlaku.

Lisování dřeva nám může zajistit zlepšení některých jeho fyzikálních a mechanických vlastností. Pokud lisujeme napříč vláken, zvyšujeme hustotu dřeva,

a tedy i jeho pevnost. Při lisování podél vláken je výrazně zvyšuje ohýbatelnost dřeva, čehož se využívá například u studeného ohýbání (Obr. 1). Tento typ modifikace se využívá také pro estetické účely (Kupsa, 2019).



Obr. 1. Podélně stlačované dřevo – studené ohýbání (www.trendhunter.com)

2.3 Hydrotermická modifikace

Touto úpravou se rozumí ošetření dřeva za společného působení tepla a vodní páry nebo vody pro dosažení dočasných či trvalých změn fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Dočasnými změnami jsou například sterilizace dřeva nebo zvýšení pružné a plastické deformace. Do trvalých změn patří: barevná egalizace, uvolnění vnitřních pnutí, zvýšení bobtnání a snížení mechanických vlastností.

Tento proces se využívá zejména pro změnu vlastností dřeva a jeho snazší tvarování, proto se nazývá také plastifikace. Vyšší kvalitu úpravy zjišťuje ohřev ve vodě, jež se využívá při výrobě dekoračních dřív, překližek či jednotlivých nábytkových dílců. Paření a vaření probíhá při teplotách 70 až 140 °C. Nesprávnou úpravou může dojít k hloubkovým trhlinám nebo nežádoucím barevným změnám (Trebula, 1996; Kafka, 1989).

2.4 Biologická modifikace

Houby, bakterie, či plísně jsou vnímány zpravidla jako nežádoucí, což ale nemusí být vždy pravda. Jejich vliv je často nedestruktivní a pro některé účely využití dřeva může být i výhodou.

Některé typy bakterií (*Bacillus subtilis*) narušují tečky a dvojtečky v buněčných stěnách, či degradují buněčný obsah dřevných paprsků. To má dle výzkumů (Ellwood a Eckland, 1959) za následek zvýšení propustnosti dřeva, což může být výhodou při jeho impregnaci či natírání. Jiné bakterie dokážou například inhibovat růst plísní či rozšiřování dřevozbarvujících huby. Vliv bakterií na změny mechanických vlastností dřeva, ale není nijak výrazný (Reinprecht, 2016).

Plíseň (*Trichoderma viride*) narušuje ve dřevě ztenčeniny (difuzí enzymů do vlhkého materiálu) a tím opět zvyšuje jeho propustnost (Reinprecht a Pánek, 2008; Pánek a kol., 2013).

Využití dřeva napadeného houbami je zatím jen ve fázi výzkumu. Jako možnost se nabízí využití bílé hniloby (*Ceriporiopsis subvermispora*), pro řízený proces delignifikace v papírenských průmyslech (Solár a Lang, 2006). U dřevozbarvujících hub se nejvíce využívá jejich schopnosti zabarvit dřevo. Vznik těchto barevných efektů se využívá například k oživení designerských prvků ze dřeva (Joleková a kol., 1996).

3 Termická modifikace

Základním důvodem, proč vyrábíme termicky modifikované dřevo, je zlepšení jeho vybraných vlastností oproti rostlému dřevu. Patří sem převážně zvýšení odolnosti vůči biologickým škůdcům a zlepšená rozměrová stabilita, díky čemuž ho můžeme použít i pro náročnějších exteriérové a interiérové expozice. Zde může plnit stejnou roli jako velmi trvanlivé neupravené exotické dřeviny.

Během termické modifikace se nepoužívají žádné toxické chemikálie, jedná se o úprava dřeva pouze působením vysokých regulovaných teplot (respektive i vodní páry nebo rostlinného oleje), kdy záměrně upravujeme jeho chemickou strukturu. Změny ve struktuře dřeva nastávají hlavně vlivem zvýšené teploty, a to v intervalu od 150 do 260 °C, jež zpravidla působí po dobu 15 minut až 24 hodin. Velikost změn ve struktuře a vlastnostech termicky upraveného dřeva je ovlivněna také prostředím, ve kterém se termická úprava prováděla (oxidační atmosféra; bez vzduchu = inertní prostředí bez kyslíku) a také vstupní vlhkostí dřeva. Upravovat můžeme, jak mokré, tak i vzduchem sušené dřevo.

Pro termickou modifikaci se využívají různé technologie realizace (Kap. 3.3), s různým dopadem na strukturu (Kap. 4.1) a vlastnosti, jako jsou například barva a houževnatost (Kap. 4.2) nebo tvrdost (Kap. 4.3) (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Hlavním cílem termické modifikace rostlého dřeva, je upravit jeho vlastnosti, které by vyváženě splňovali následující kritéria:

- vyšší odolnost vůči dřevozbarvujícím a dřevokazným houbám a plísním,
- vyšší odolnost vůči mořským škůdcům a dřevokaznému hmyzu,
- vyšší rozměrová stálost,
- nižší hygroskopicita,
- zachování či dokonce zlepšení estetické stránky – lesk, barva, menší podíl trhlin, textura,
- zachování, či dokonce zlepšení mechanických vlastností – houževnatost, pevnost, tvrdost apod. (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

3.1 Historie a vývoj termické modifikace dřeva

Pozitivní vlastnosti dřeva opáleného v ohništi, znali již naši předkové, kteří například opalovali konce oštěpů, čímž zvýšili jejich tvrdost, či kůly pro lepší odolnosti vodě. Později se využívalo tepelného ošetření například pro záhlaví stropních trámů, kdy vzniklá zkarbonizovaná vrstva opět zvyšovala jeho přirozenou trvanlivost (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

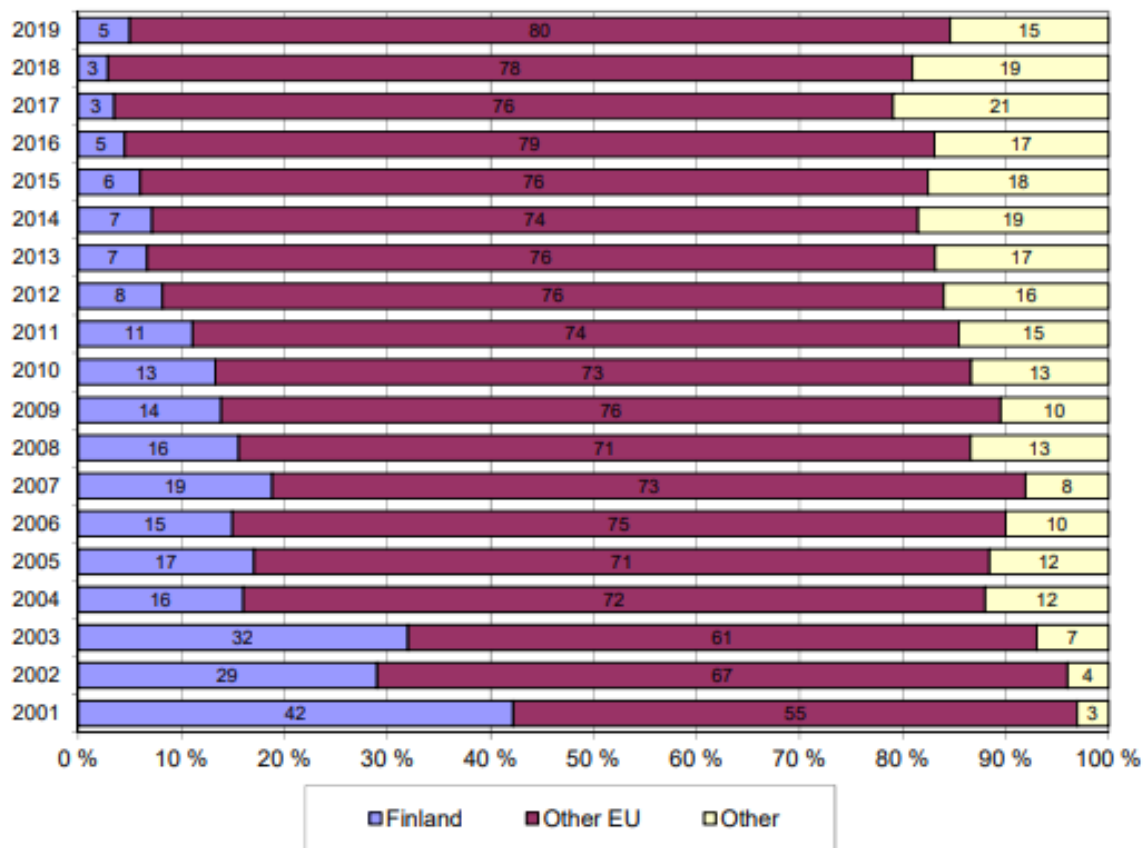
Tiemann (1915), byl jedním z prvních, kteří podali zprávu o změně fyzikálních vlastností dřeva při vysokých teplotách. Ohřál na vzduchu vyschlé dřevo v přehřáté páře o teplotě 150 °C, po dobu 4 hodin, což snížilo jeho následnou sorpci vlhkosti o 10-25 % (HILL, 2006).

První přínosy založené na vědeckých výzkumech, byly již mezi 30. až 70. léty 20. století. První pokusy byly například v USA v Madisonu, kde vzniklo tepelně upravené dřevo pojmenované „Staybwood“ (Stamm a kol., 1946). Pro praxi však bylo využíváno minimálně, díky technologické náročnosti jeho výroby.

V dnešní době je největším producentem termicky upraveného dřeva Evropa a v ní konkrétně Finsko, kde jeho výroba započala a také zde vznikl obchodní název termicky upraveného dřeva. Další výrobci termicky modifikovaného dřeva se nachází například v Holandsku, Francii, Německu a Rakousku. Průmyslově se termicky modifikované dřevo vyrábí již 17 let (Reinprecht a Vidholdová, 2008; Kubš, 2019).

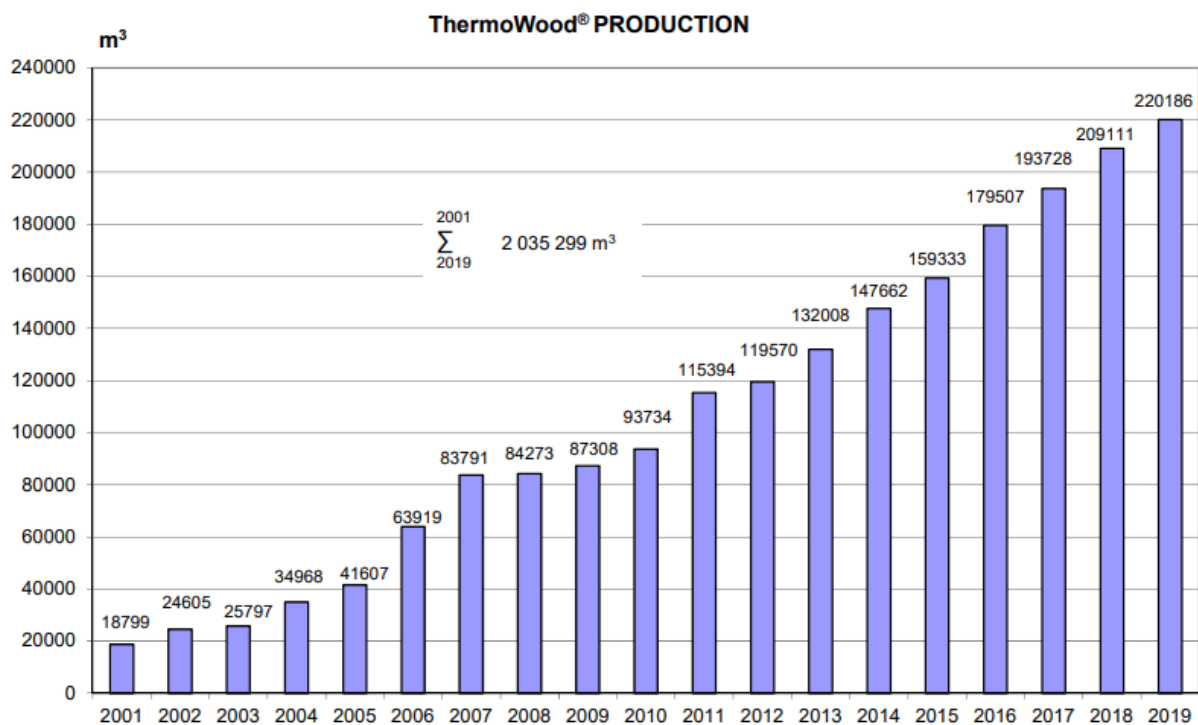
Díky změně legislativy chemické ochrany dřeva, dochází dnes k enormnímu rozšiřování do více států Evropy a celého světa, jak můžeme vidět na Obr. 2. Jeho rozšiřování má za následek i ekologičnost během životnosti produktu a možnost využít nekvalitní druhy dřevin pro kvalitní a trvanlivé výrobky. Každým rokem se v Evropě vyrobí přibližně 220 tisíc m³ (Obr. 3) termicky upraveného dřeva, a to hlavně ve výše zmiňovaných zemích (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Ze všech různých procesů modifikace dřeva, které byly studovány, je tepelná modifikace zatím nejpokročilejší. Tento způsob úpravy dřeva je již dlouho považována výhodnou metodu pro zlepšení rozměrové stability dřeva a zvýšení jeho odolnosti proti rozpadu (HILL, 2006).



Obr. 2. Zastoupení výroby termicky upraveného dřeva v letech 2001–2019

(www.asiakas.kotisivukone.com)



Obr. 3. Objemový nárůst výroby termicky upraveného dřeva v letech 2001–2019

(www.asiakas.kotisivukone.com)

3.2 Vliv teploty na dřevo

Dřevo je zvýšeným teplotám vystavováno poměrně často díky slunečnímu záření, a to jak v exteriéru, tak interiéru. Jeho teplota se může častokrát pohybovat i okolo 50-80°C. Spolu s působením vody (srážkové), dochází k plastifikaci ligninu, čemuž se dále věnujeme viz (Kap. 4.1.3), v důsledku čehož se stává poddajnějším. Toho se využívá například i v hydrotermické úpravě dřeva, pomocí technologie páření a vaření, jak jsme již zmínili v (Kap. 2.3).

Druhým nejběžnějším důvodem zvyšování teploty dřeva, a to od 50 do 130 °C, je umělé sušení – kondenzační, konvenční, infračervené, dielektrické, ale i jiný způsob ohřevu. V procesech lisování (DTD, překližky), či během kontaktního sušení se teplota dřeva pohybuje mezi 100–150 °C, případně i výše (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Z pohledu termické modifikace dřeva nastává otázka, zda i tyto teploty způsobují ve dřevě chemické změny jež mají dopad na jeho fyzikálně mechanické vlastnosti. Odpověď zní, že i při takto nízkých teplotách dochází k chemickým změnám ve dřevní struktuře, ale s nárůstem teploty se výrazně urychlují. Termolytické a termooxidační děje ale potřebují určitou aktivační energii, kterou dodáváme nejčastěji sálavým zdrojem tepla, ale i jinak (Reinprecht, 1996). Určení reakční teploty, kdy začne docházet ke změnám v chemické struktuře je nereálné a pro praktickou aplikaci nemožné (Melcer a kol., 1990).

Výraznějších změn v chemické struktuře dřeva se dosahuje až při vystavení teplotám nad 150–170 °C, čehož při výrobě termicky upraveného dřeva využíváme. Začíná se měnit struktura polysacharidů a doprovodných látek, kdy zanikají hydrofilní OH skupiny, probíhají kondenzační a depolymerizační reakce, s čímž je spojen únik hořlavých plynů a karbonizace dřeva. V důsledku toho dřevo tmavne, křehne, ale hlavně získává pozitivní vlastnosti. Při nárůstu teplot nad 300 °C dřevo většinou vzplane a dochází k jeho uhelnatění a přeměně na popel (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Podrobnějšímu popisu změn chemické struktur dřeva a jeho fyzikálně mechanických vlastností, vyvolaných zvýšenou teplotou, se věnujeme dále (viz Kap. 4).

3.3 Základní způsoby termické modifikace

Během úpravy dřeva termickou modifikací, je nutné ho vystavovat po delší dobu teplotám v rozsahu 150–260 °C. Jednotlivé technologie výroby termicky modifikovaného dřeva, používají ale jiné rozsahy teplot a rozdílné postupy, na základě čehož je také rozdělujeme (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Dnes v Evropě používané, jsou například tyto:

- příprava v ochranné atmosféře vzduchu ThermoWood[®],
- příprava v prostředí inertních plynů RetificatedWood,
- příprava v ochranném prostředí vodní páry Plato[®]Wood,
- příprava v horkých olejích OHT-Wood, RoyalWood.

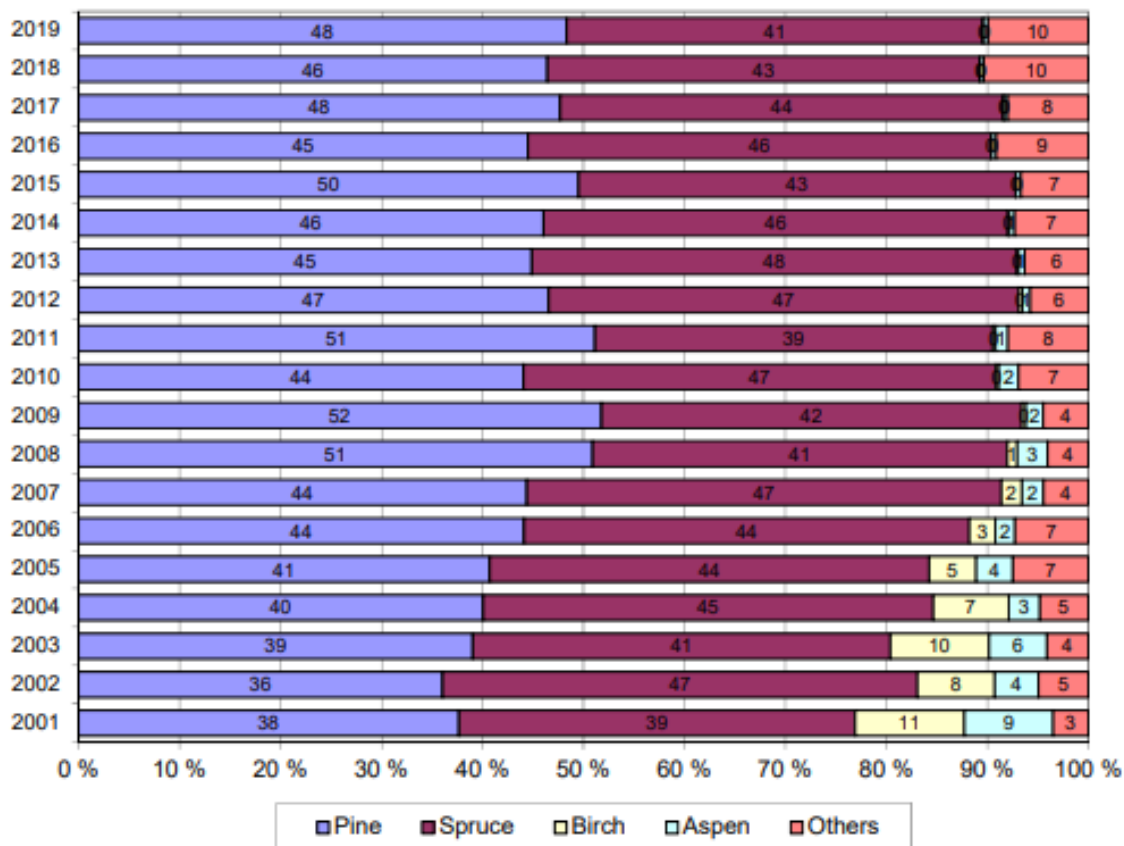
Pro jednotlivé procesy tepelné modifikace dřeva existují patentově chráněné normy, jako jsou například: EP0759137, 1995; EP0018446, 1982; EP0623433, 1994; US5678324, 1997; EP0612595, 1994. I přes to se neustále objevují a zdokonalují některé technologie jeho výroby. Pro každý proces se odvíjí jeho přesné postupy a metody podle zvoleného druhu listnatého či jehličnatého dřeva. Mezi nejčastěji modifikované patří místní dřeviny, jejichž fyzikálně-mechanické vlastnosti nestačí pro zvolený účel použití (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Pro tepelnou úpravu dřeva lze použít velké množství metod, které se liší těmito proměnnými:

- teplota prostředí,
- typ prostředí (kyslík, pára apod.),
- doba expozice,
- katalyzátory (kyseliny, zásady),
- počáteční vlhkost dřeva (suché i mokré),
- rozměry dřeva,
- druh dřeva.

Přesný způsob úpravy (volby proměnných), má často významný vliv na jeho vlastnosti. Tepelná energie pro ohřev prostředí je dodávána buď pomocí tepelných olejových zásobníků nebo z elektrických výhřevných těles. Pro zvyšování ekologičnosti procesu výroby, se také energeticky (spalováním) využívají plyny uvolňované ze dřeva.

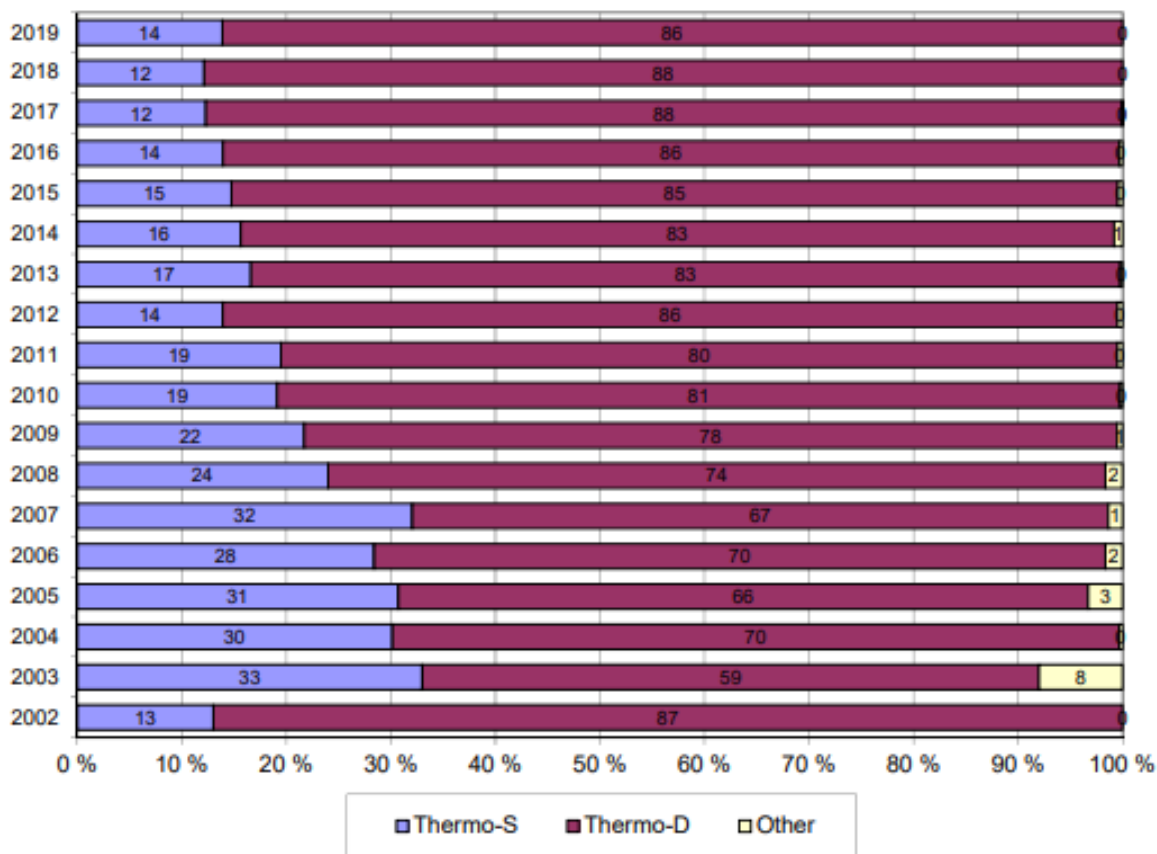
Jednotlivé technologické postupy se vzájemně liší i primárním využíváním některých dřevin, jak jsme již zmínili výše. Nejčastěji se však používají méně trvanlivé (borovice, smrk, bříza, jasan, buk, dub, osika). Jejich podrobnější zastoupení můžeme vidět na Obr. 4 (Reinprecht a Vidholdová, 2008).



Obr. 4. Zastoupení dřevin ve výrobě termicky upraveného dřeva v letech 2001–2019
(www.asiakas.kotisivukone.com)

3.3.1 ThermoWood®

Výroba tohoto typu tepelně modifikovaného dřeva započala v 90. letech 20. století ve Finském městě Mänttä, kde byla vyvinuta společností VTT. Jedná se o registrovanou značku, kterou vlastní společnost Finnish ThermoWood Association (HILL, 2006). Ta má také za cíl kontrolovat kvalitu materiálů z ThermoWoodu, vyrobených jinými firmami ve světě. Zároveň tyto výrobky klasifikuje podle jejich vlastností. Převážně se jedná o výrobky Thermo-D, jež se používá hlavně v exteriéru a Thermo-S, používané pro interiér, viz Kap. 3.6. Zastoupení těchto tříd v závislosti na vývoji ThermoWoodu můžeme vidět na Obr. 5 (Reinprecht a Vidholdová, 2008).



Obr. 5. Zastoupení tříd S a D u výrobků značky ThermoWood® v letech 2001-2019
(www.asiakas.kotisivukone.com)

Pro výrobky ThermoWood je typické dřevo borovice a smrku, přičemž u obou je nevýhodou výskyt smolníků, které dřevo znehodnocují. Pro výrobky do interiéru se nejvíce používá dřeva břízy (sauny) a osiky.

Pro výrobky ThermoWood® se používá licenční ThermoWood proces (VTT, Stora, Finnforest, Finsko) (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

ThermoWood výrobní proces probíhá v následujících třech etapách (Obr. 6):

1. Navýšení teploty a sušení:

Nejdříve dochází k rychlému nárůstu teploty v sušárně na cca 100 °C, zároveň s působením vodní páry. V další fázi narůstá pozvolně teplota na 130 °C. Sušení probíhá pomocí horké páry či horkého vzduchu. Díky této etapě dosáhneme u dřeva skoro nulové vlhkosti.

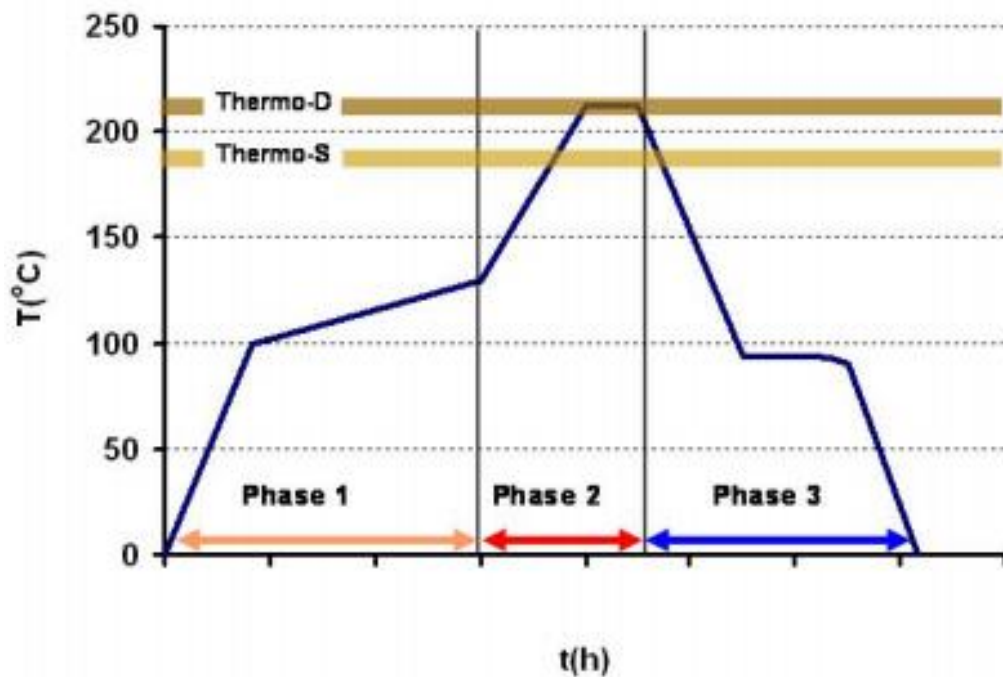
2. Termická modifikace:

Nastává zvyšování teploty na 185 až 230 °C, a to na dvě až tři hodiny. Tyto

parametry se odvíjí od našich požadavků na klasifikační třídu, zda vyžadujeme úpravu Thermo-S nebo Thermo-D, tomu se podrobněji věnuje Kap. 3.6.

3. Chlazení a klimatizace:

V této fázi postupně ochlazujeme již modifikované dřevo na teplotu 80 až 90 °C. Dále ho také vlhkovně stabilizujeme na konečnou vlhkost, tak aby byla na běžných 4 až 7 % (Viitaniemi a Jämsä; 1996, Jones a kol., 2006).



Obr. 6. Schéma výroby ThermoWoodu[®] (ThermoWood handbook, 2003)

3.3.2 RetificatWood

Tento způsob modifikace dřeva se používá nejvíce ve Francii. Jeho výroba předpokládá inertní ochranné prostředí dusíku a relativně vysoké teploty, pohybující se až kolem 260 °C. Vyrábí se podle licenčního Ratifikačního procesu (NOW, což je zkratka pro New Option Wood) (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Před samotnou výrobou je nutné nejdříve dřevo předsušit na vlhkost 12 %. Následně dřevo zahříváme na teplotu 210-260 °C, avšak v inertním prostředí dusíku, kdy podíl kyslíku by měl být pod 2 %. Ve dřevě dochází k mírné pyrolýze, ale termooxidační reakce jsou zastoupeny v menší míře, díky čemuž si dřevo stále zachovává svou pevnost (Armines, 1986).

3.3.3 Plato[®]Wood

Plato[®]Wood proces, je technologie termické modifikace dřeva, používaná například v Holandsku v Arnhem. Nejčastěji modifikovanou dřevinou je smrk, dále také douglaska, bříza, borovice a topol. Uplatňuje se například při výrobě venkovních dveří, oken, obkladů, zahradního nábytku či plotů. Oproti rostlému dřevu má sníženou hygroscopicitu asi o 30-40 % a zvýšenou rozměrovou stálost až o 50 %. Zvyšuje se také jeho odolnost vůči biologickým škůdcům. Modul pružnosti zůstává stejný, případně nepatrně roste o 0-10 %. Pevnosti v ohybu klesá o 5-10 % (Reinprecht, 2008).

Výroba se provádí podle patentovaného procesu (PLATO, což znamená Providing Lasting Advanced Timber Option). Oproti ostatním technologiím využívá nižší teplotu a zvýšený tlak, při použití prostředí vodní páry (Kubš, 2019).

Během výroby je nutné absolvovat čtyři fáze, jež jsou realizovatelné jak při zvýšeném, tak i atmosférickém tlaku. Parametr času je ovlivněn zejména tvarem a druhem dřeva. (Militz, 2001).

1. Hydrotermolýza:

Jako první se provádí hydrotermická úprava čerstvého nebo sušeného dřeva, v rozmezí teplot 150-190 °C, při navýšeném tlaku 0,6-1 MPa, po dobu 4-5 hodin. Na suché dřevo se používá vodní pára a při úpravě mokrého horký vzduch. U suchého dřeva nedochází k výraznému navýšení vlhkosti, pohybuje se kolem 14-20 %. Částečně se odbourávají hemicelulózy a aktivuje se lignin, přičemž celulóza zůstává nezměněná.

2. Sušení:

V této etapě, se již aktivované dřevo ukládá do sušáren a zde se suší cca 3-5 dní. Je nutné dosáhnout vlhkosti 8-10 %, tedy doba sušení může být i delší (až tři týdny).

3. Vytvrzování:

Následuje proces vytvrzení (stabilizace) dřeva, kdy je vystavováno za teplot v rozmezí 150-190 °C po dobu 12-16 hodin, a to za atmosférického tlaku 0,1 MPa, při omezeném přístupu vzduchu. Během této doby dochází k zesíťování makromolekul ligninu, a to pomocí produktů z rozložených hemicelulóz. Spojování zajišťují například methylenové vazby. V této fázi klesne vlhkost dřeva, a to pod 1 %.

4. Kondicionování

V následujících třech dnech probíhá jeho zvlhčování v sušárně, na hodnotu 4–6 % (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

3.3.4 OHT-Wood, RoyalWood

Technologie OHT-Wood:

OHT-Wood technologie je známá využíváním rostlinných olejů pro tepelnou modifikaci dřeva. Výroba se provádí dle patentovaného OHT procesu (Oil Heat Treatment), a to firmou Menz Holz v Německu.

Základ tvoří impregnační kotle, v nichž se nachází horký rostlinný olej o teplotách 200-220 °C. Ten proniká do struktury dřeva a ohřívá ho. Díky jeho přítomnosti se také omezuje množství kyslíku, a tedy i termooxidační reakce uvnitř materiálu. Důležité je udržení teploty 180-200 °C pod dobu 2-4 hodin ve středu termicky upraveného materiálu. Na 1 m³ dřeva je průměrná spotřeba oleje v rozsahu 20-60 kg. Nejpoužívanějším je lněný olej, jež zajišťuje rovnoměrný a rychlý přenos tepla (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Důležitá je i otázka polymerizace olejů v již modifikovaném dřevě, díky přístupu kyslíku. Například triglyceridy mohou z části proniknout také do buněčných stěn ve dřevě (Rosenqvist, 2000).

Mezi stále častěji používané patří modifikované oleje (reaktivní rostlinné), které dokážou ve dřevě zesíťovat a jsou tedy stabilní. V tom případě hovoříme již o kombinaci chemické a termické modifikace, jež pozitivně zvyšuje bioodolnost (Tjeerdsma a kol., 2005).

Technologie RoyalWood:

Tato technologie výroby tepelně modifikovaného dřeva, je v dnešní době využívána jen vzácně, díky existenci dokonalejších technologií vyrábějících termicky upravené dřevo. Původním významem tento proces, bylo sušení dřeva. Jedná se o úpravu dřeva nižšími teplotami, opět v prostředí olejů. Dřevo je vystaveno sníženému tlaku a teplotě 60-90 °C. Olej v tomto případě nevniká do buněčných stěn, jak tomu může být při výrobě OHT-Wood a na konci procesu je odsáván při vakuu (Kubš, 2019).

3.4 Trvanlivost termicky upraveného dřeva

Základním důvodem, proč vyrábíme termicky modifikované dřevo, jak jsme již zmiňovali v Kap. 3, je zvýšení jeho trvanlivosti (vybraných vlastností), oproti

rostlému dřevu. Díky tomu ho můžeme použít i do náročnějších exteriérových a interiérových expozic, kde může plnit stejnou roli jako velmi trvanlivé neupravené exotické dřeviny (Reinprecht a Vidholdová, 2008). Pojem trvanlivost dřeva představuje zejména jeho odolnost vůči hmyzu, plísním, dřevokazným houbám, ale i dalším biologickým škůdcům. Tento pojem dále zahrnuje odolnost dřeva vůči atmosférické degradaci, mechanickému opotřebení či požáru (Stamm, 1946; Kubš, 2019).

Dnes se jedná o komerčně využívanou možnost navyšování jeho přirozené trvanlivosti. Termicky modifikované dřevo (např. ThermoWood®), je používáno převážně pro 3. třídu ohrožení, tedy exteriér bez kontaktu se zemí (Reinprecht, 2016). Použití termicky modifikovaného dřeva pro náročné expozice v kontaktu se zemí, tj 4. a 5. třída, podle normy EN 335-1, se zatím nedoporučuje (Syrjänen a Kangas, 2000; Scheiding a kol., 2005).

3.4.1 Odolnost vůči biologickým škůdcům

Biologická odolnost termicky upraveného dřeva je navýšená, díky úpravě vyššími teplotami, konkrétně 150-260 °C, kdy dochází ke změně jeho chemické struktury. Jedná se například o tyto změny (Kubš, 2019):

- rozkladem části hemicelulóz, jež jsou „potravou“ pro hmyz a houby;
- vznik látek, které mají biocidní charakter a vznikli z tepelně degradovaných složek dřeva (fenantrén) a také z jeho extrahovatelných látek (Kretschmann, 1997);
- pokles podílu funkčních OH skupin, čímž se snižuje sorpční kapacita materiálu, a tedy i jeho vlhkost; na té jsou závislí i jednotliví škůdci: houby $w_{\min} = 20 \%$, hmyz $w_{\min} = 10 \%$; dochází i ke změně transportu enzymů vytvářených houbami (Yinodotlgör, 2010).

Pokud se vlhkost dřeva dostane k 20 %, je již potřebná jeho odolnost vůči plísním a houbám (Yinodotlgör, 2010). Nemodifikované dřevo je méně odolné proti hmyzu a houbám, v porovnání s termicky modifikovaným dřevem (Kretschmann, 1997).

Trvanlivost vůči houbám:

Tjeerdsma (1998, 2000, 2002) zjistili, že termická modifikace procesem Plato významně zlepšila odolnost termicky upraveného dřeva vůči hnědé hnilobě (*Coniphora puteana*), jež byla lepší než u bílé hniloby (*Trametes versicolor*) (HILL, 2006).

Díky studiu tepelného zpracování borovice, smrku a buku bylo zjištěno, že jejich úpravou při 200 °C po dobu 4 hodin se zvýšila jejich odolnost vůči rozpadu a dvě až tři třídy trvanlivosti (Hanger a kol. 2002; HILL, 2006).

Biologická odolnost výrobků ThermoWood je zvýšena převážně vůči ligninivorním (*Trametes versicolor*) a celulózovorním (*Poria placenta*, *Coniphora puteana*) houbám (Kamdem, 2002; Mitchell, 1988).

U tepelně modifikovaného dřeva nebylo, podle (Tjeerdsma a kol., 1998), možné zcela zabránit útoku měkké hniloby, i přes zvýšenou odolnost. Jednalo se o pokus v nesterilní půdě.

Trvanlivost vůči hmyzu:

Dřevěné vzorky, ošetřené horkým vzduchem o teplotě 150 °C nebo horkou párou o teplotě 150 °C po různou dobu, byly vystaveny útoku termitů (*Coptotermes formosanus*). U vzorků ošetřených parou byl pozorován kladný vliv úpravy pro útok termitů, zatímco u ošetřených vzduchem byl vliv velmi malý (HILL, 2006).

3.4.2 Odolnost vůči atmosférické degradaci

Tento způsob degradace je zapříčiněn zpravidla více atmosférickými činiteli, jako jsou například (vítr, voda, sluneční záření, vzduchem unášené částice, kyslík, emise apod.). Velikost jejich vlivu na termicky upravené dřevo závisí opět na způsobu jeho výroby (Kretschmann, 1997).

Díky snížené higroskopicitě má tepelně upravené dřevo nižší vlhkost než rostlé dřevo, a to i při exteriérové expozici. S tím je spojena také jeho rozměrová stabilita a trvale nižší rovnovážná vlhkost. Z toho důvodu také nedochází k častému vzniku trhlinek na jeho povrchu (Kretschmann, 1997).

Vlivem kyselých dešťů, UV záření a kyslíku, ztrácí termicky upravené dřevo svou zpravidla tmavou barvu a získává šedivé odstíny. V důsledku toho se dřevo

povrchově ošetřuje. Obzvláště v exteriéru se používají barvy, s podílem pigmentů a UV-absorbentů, popřípadě různé oleje (Welzbacher, 2005).

Nevýhodou termicky upraveného dřeva je jeho vyšší náchylnost vůči abrazivním činitelům než u rostlého dřeva. V důsledku toho dochází k erozi jeho povrchu, působením malých částic, unášených větrem (Kačíková a kol., 2013).

3.4.3 Protipožární odolnost

Výhodou tepelně modifikovaného dřeva je nižší tvorba dýmu v průběhu jeho hoření. Požární odolnost je vůči rostlému dřevu mírně snížena, což pravděpodobně souvisí s uvolňováním těkavých sloučenin během jeho zpracování. U OHT modifikace je rozdíl ještě patrnější, díky přítomnosti olejů. (Kretschmann, 1997; Wang a Cooper, 2007).

3.5 Obrábění termicky modifikovaného dřeva

Manipulace s ThermoWood materiály, vyžaduje větší opatrnost než u rostlého dřeva, jelikož je náchylnější k mechanickému poškození. Pro jeho opracování se doporučuje používat postupy stejné jako u tvrdého dřeva a také mít vždy dobře naostřené nástroje (ThermoWood handbook, 2003). To zajišťuje hladkost řezné plochy a snížení řezné síly. K jeho opracování se používají klasické ruční i strojní způsoby. Nevýhodou může být vznik drobného prachu, který je nutno odsávat díky prevenci jeho vdechování a také znečišťování pracovního prostředí. Během obrábění dochází také k uvolňování aromatických látek, jež termicky upravenému dřevu dodávají typický karamelový zápach (Kačíková a kol., 2013). Díky tepelnému ošetření dochází ke vzniku pryskyřičných náplastí, které je nutné odstranit hoblováním (HILL, 2006).

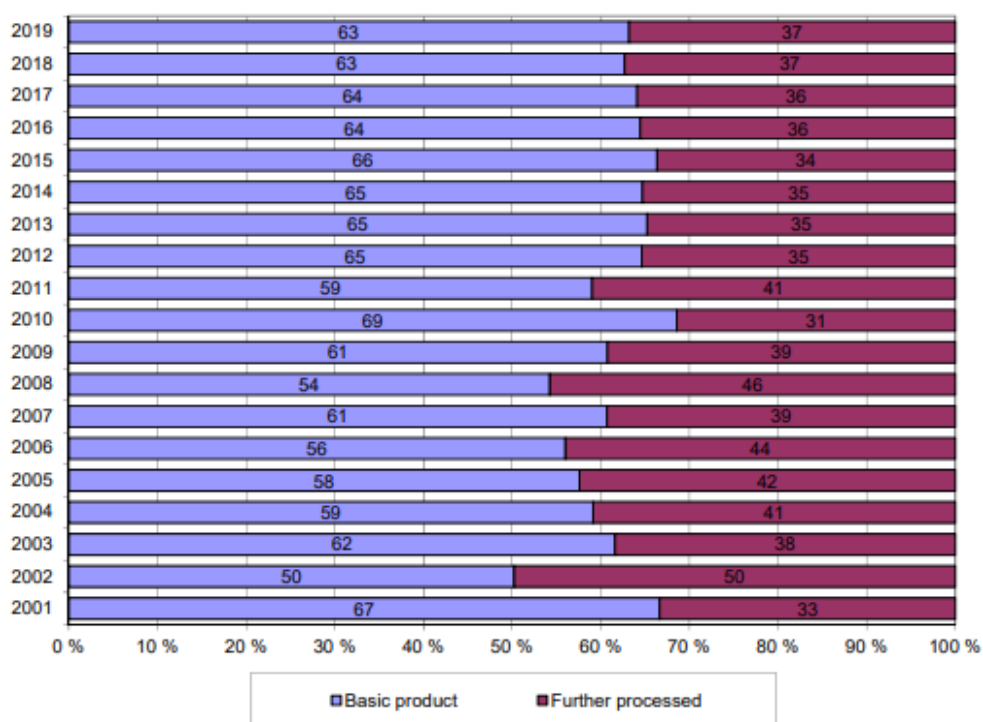
3.6 Využití termodřeva

Díky velkému množství technologických postupů (ThermoWood, OHT-Wood, Retificated Wood, PlatoWood), používaných na výrobu termicky upraveného dřeva, můžeme ovlivňovat jeho vlastnosti, v závislosti na jeho budoucím využití. Díky tomu nachází své uplatnění, jak pro interiérové, tak pro exteriérové expozice.

Termicky modifikovaným dřevem, můžeme nahrazovat výrobky z trvanlivých tropických dřevin. K tomu využíváme i dřeviny jako (bříza, buk, smrk), které by jinak bylo nutné chemicky, a tedy i méně ekologicky ošetřit (Reinprecht, 2016). Tepelně upravené dřevo nevykazuje žádnou další toxicitu, při porovnání s rostlým dřevem, díky čemuž s ním můžeme být neustále v kontaktu. Likvidace výrobků z termicky upraveného dřeva není nijak složitá (spálení, či jiná likvidace dřevního odpadu) (Kubš 2019).

Tepelné úpravy se využívá také k ošetření aglomerovaných materiálů. Při tepelném ošetření OSB desky, podle (Goroyias and Hale, 2002), dochází k vyrovnávání vnitřních pnutí, což je spojené se zvýšením její stability.

Na (Obr. 7) můžeme vidět procentuální využití termicky upraveného dřeva na základní a ostatní produkty.



Obr. 7. Zastoupení základních a ostatních výrobků u termicky upraveného dřeva
(www.asiakas.kotisivukone.com)

U výrobků z technologie ThermoWood se rozlišují dvě základní třídy kvality, zvlášť pro jehličnaté a listnaté dřeviny. Jedná se o třídu Thermo D a Thermo S, které se liší výrobními parametry, a tedy i vlivem na konečné vlastnosti materiálu. Jejich využití je znázorněno na Obr. 8.

<p>Jehličnaté dřeviny (smrk, borovice, ...)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • interiérové konstrukční prvky • podlahy • okna a dveře • nábytek • sauny • obklady 	<ul style="list-style-type: none"> • obklady • dlažby • dětská hřiště • protihlukové bariéry • sauny a koupelnový nábytek • konstrukce do exteriérů
<p>Listnaté dřeviny (bříza, osika, ...)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • interiérové konstrukční prvky • nábytek • sauny • podlahy 	<ul style="list-style-type: none"> • termodřevo je tmavší, protože se upravilo vyšší teplotou • podobné jako Thermo-S

Obr. 8. Možnosti využití pro Thermo S a Thermo D (Kubš, 2019)

Exteriérové využití:

Při aplikaci v exteriéru se využívá nejvíce 3. třídy ohrožení, což je bez expozice bez kontaktu s terénem bez přístřešku. Využíváno je například pro (vchodové dveře, okna, obklady fasád, ploty, zahradní nábytek, terasy, altány atd.) (Reinprecht a Vidholdová, 2008).



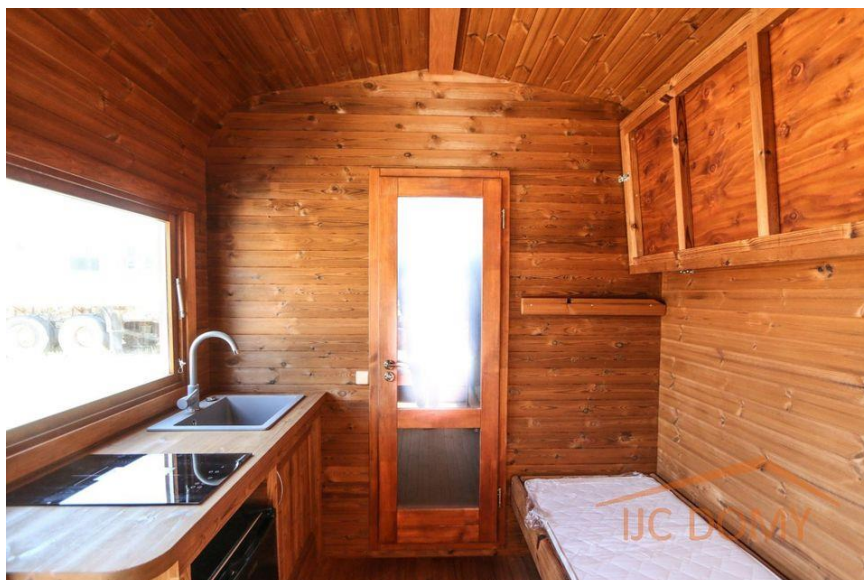
Obr. 9. Využití termicky upraveného dřeva v exteriéru (www.prokom.cz)

Interiérové využití:

Pro interiérovou expozici jsou typické třídy ohrožení 1 a 2, kdy výrobek je bez kontaktu se zemí a pod přístřeškem (Reinprecht, 2016). Jeho využití zde má široké uplatnění, a to například jako (stěnové či stropní obložení, podlahy, sauny, koupelnový a kuchyňský nábytek, parkety, či dokonce na hudební nástroje atd.). Jeho často tmavá barva patří mezi vyhledávané designové doplňky, stejně jako odolnost vysokým teplotám a vlhku bez nutnosti jeho další úpravy (Kubš, 2019).



Obr. 10. Využití termicky upraveného dřeva v interiéru – sauna (www.sauneco.com)



Obr. 11. Využití termicky upraveného dřeva v interiéru – mobilní dům
(www.mobilnidomy-kolin.cz)

4 Změny ve struktuře a vlastnostech termicky upraveného dřeva

Jak jsme již zmínili na začátku (Kap. 3), dochází vlivem tepelné modifikace dřeva, a to při jakémkoli ze zmíněných procesů (Kap. 3.3), ke změně jeho fyzikálně mechanických vlastností. Jejich původ je nutně spojen se změnami v jednotlivých složkách chemické struktury dřeva. Podrobnějšímu popisu jednotlivých změn (chemická struktura, barva, tvrdost, a houževnatost), se věnují následující tři podkapitoly (Kap. 4.1; Kap. 4.2 a Kap. 4.3).

4.1 Změny v chemické struktuře

Mezi základní složky dřeva patří: celulóza, hemicelulóza, lignin a extraktivní látky. Ty jsou u každého druhu zastoupeny v jiném množství a pokaždé vytváří originální struktury, které mají vliv na jeho další vlastnosti.

Výraznější degradace dřeva se projevují až při tepelné úpravě při teplotách nad 100 °C. Nižší teploty mají jen minimální dopad na chemické změny. Jako první začínají degradovat extraktivní složky dřeva (pryskyřice, třísloviny atd.). Jako další se začínají rozkládat hemicelulóza, a to výrazně i při teplotě pod 200 °C. Rozklad celulózy nastává, pokud se zvýší teplota nad 300 °C. Lignin jako nejstabilnější složka degraduje až okolo teploty 350 °C (Reinprecht, 1997; Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Podstatou termické modifikace jsou cílené zásahy do jeho chemické struktury působením teplota, za účelem pozitivní změny některých jeho vlastností (barva, hygroskopicitata, pevnost, rozměrová stabilita) (Kubš, 2019).

4.1.1 Celulóza

Obecně je známo, že celulóza degraduje při vyšších teplotách než hemicelulóza, i když v malé míře degraduje i při nízkých teplotách. Ke snižování polymerizačního stupně dochází již za teploty 150 °C. To je pravděpodobně způsobeno amorfní, částí celulózy, náchylnější na tepelný rozklad. Druhou složkou celulózy je krystalická část, k jejíž degradaci dochází až vlivem teplot v rozmezí 300-340 °C (Kim et al., 2001).

Při modifikaci v prostředí vzduchu je degradace rychlejší, díky oxidaci OH skupin. Je také patrné žloutnutí celulózy v důsledku uvolňování karbonylových skupin (HILL, 2006). Primárním produktem získaným tepelným rozpadem celulózy, byl zjištěn levoglukosan (Sanderman a Augustin, 1964).

4.1.2 Hemicelulóza

K termolýze hemicelulózy dochází mezi teplotami 100-260 °C. Do teploty 150 °C se jedná o její dehydrataci a nad tuto teplotu také o depolymerizaci. Jejím rozkladem vzniká například methanol, kyselina octová a různé těkavé heterocyklické sloučeniny, jako například (furany, γ -valerolakton, 2-furaldehyd atd.). Bylo také zjištěno, že její degradace se zvyšuje s teplotou a dobou expozice (Bourgois et al., 1989; Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Hemicelulóza tvrdých dřevin je obecně náchylnější na degradaci, a to z důvodu vyššího obsahu pentóz, náchylnějších na rozklad. Dalším důvodem je také vyšší obsah hemicelulózy než u měkkých dřevin (Fengel a Wegener, 1989).

4.1.3 Lignin

Jedná se o nejstabilnější složku buněčné stěny dřeva vůči působení tepla. Vlivem rozkladu hemicelulózy a celulózy roste poměr objemu ligninu k objemu dřeva. K významným změnám v jeho struktuře dochází až při 280 °C a výše, přičemž nestabilnější složky degradují již kolem 165 °C (Sarni et al., 1990).

Zahříváním ligninu během termické modifikace, dochází nejprve k jeho plastifikaci, při teplotách 100-180 °C. Nad teplotou 180 °C jsou patrné také chemické změny depolymerizačního a kondenzačního charakteru (Reinprecht, 2008).

Spojení ligninu zajišťují dva odlišné typy vazeb: vazby uhlík-uhlík (C-C) a etherové vazby (C-O-C). Nejnáchylnější jsou vazby etherové, alkyl-arylové a fenylglykozidové, jež se štěpí při teplotách 270-300 °C. Nižší teplota rozkladu (150–270 °C), je způsobena, pokud jsou přítomny volné OH skupiny. Ke štěpení vazeb C-C dochází při teplotách 325-330 °C, ale u rozvětvených řetězců je i při nižších. Při teplotách 350-400 °C se štěpí etherové vazby mezi methoxyly s aromatickým jádrem, což je zapříčiněno sterickými podmínkami v kondenzovaném systému (Kačík, 2000).

4.1.4 Extraktivní látky

Tepelné modifikaci v prostředí páry o teplotě 100-160 °C, bylo po dobu tří hodin vystaveno prkno ze skotské borovice o rozměrech (50 x 200 x 1500). To mělo za následek zkapalnění a migraci tuků a vosků podél axiálního parenchymu, až na povrch materiálu (Nuopponen et al., 2003). Extraktivní látky na povrchu termicky upraveného dřeva tvoří nevzhledné pryskyřičné skvrny, jež se odstraňují hoblováním (HILL, 2006).

U tepelně modifikovaného dřeva je snižená hladina emise terpenů, ale v porovnání s rostlým dřevem byly zjištěny vyšší emise kyseliny octové (Mayes a Oksanen, 2002).

4.2 Změny fyzikálních vlastností

Mezi fyzikální vlastnosti, které díky tepelné modifikaci procházejí změnami a které považujeme za důležité, patří například: barva, vůně, hustota, hmotnost, vlhkost, hygroskopicita, rozměrová stabilita, tepelně izolační vlastnosti a akustické vlastnosti. Pro nás nejdůležitější je změna barvy, jejíž hodnocení je součástí našich měření

4.2.1 Barva a vůně

Obě z těchto fyzikálních vlastností, jsou pro termicky upravené dřevo typické. Jako charakteristickou si můžeme zapamatovat hlavně vůni, která je podobná karamelu. Pro někoho může být pozitivní vlastností, ale často je popisována jako zápach. Tato vůně má základ ve vyluhovaných organických produktech, jež vznikají rozkladem hemicelulózy.

Zvýšená teplota má také vliv na zbarvení, kdy vznikají žluto-hnědé až hnědo-černé odstíny. Čím déle a čím vyššími teplotami dřevo upravujeme, tím tmavší barvu získává, jak vidíme na Obr. 12. Použitím technologie OHT-Wood, získává dřevo speciální barvu a také lesk (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Tyto vlastnosti opět velmi souvisí s podmínkami jeho výroby. Bylo vyzorováno, že termicky upravené dřevo v prostředí vzduchu, dosahovalo vyšších barevných změn než při úpravě v prostředí dusíku. V případě že výrobky exteriérových

expozicích nejsou nijak ošetřeny (oleje, UV-stabilizéry), barva časem vymizí a dřevo zešedne (Syrjänen a Kangas, 2000).



Obr. 12. Vliv stupňů termické úpravy na barvu dřeva dubu (www.researchgate.net)

4.3 Změny mechanických vlastností

Důležité změny v důsledku tepelné modifikace nastávají i na mechanických vlastnostech dřeva. Mezi takové patří pevnost, pružnost, tvrdost a houževnatost.

Mechanické vlastnosti vypovídají o tom, jak moc je dřevo schopné odolávat účinkům vnějších sil. Tyto síly vyvolávají deformace ve struktuře dřeva v závislosti na odporu, vyplývajícím z jeho stavby a složení, výsledkem čehož vznikají trvalé nebo dočasné změny na jeho tvaru (Požgaj, a kol., 1997).

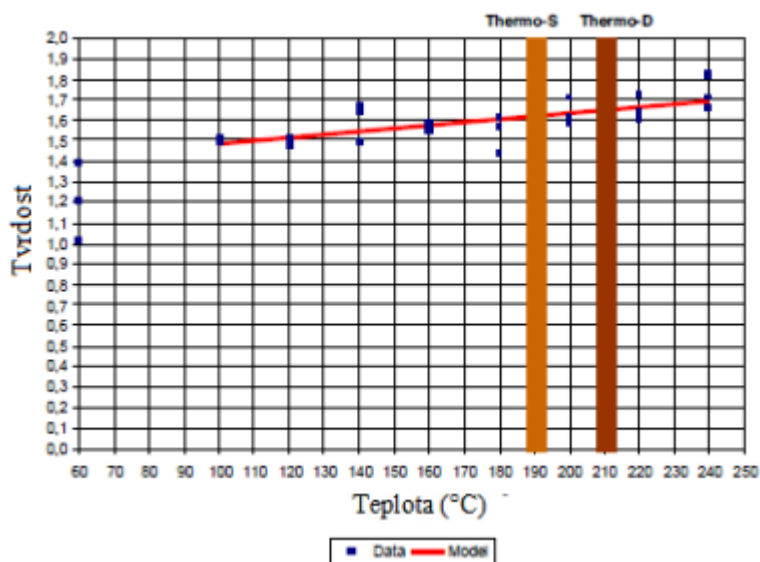
4.3.1 Tvrdost

Tato vlastnost dřeva je charakterizována schopností klást odpor proti vniknutí cizího tělesa do jeho struktury. Její vliv se projevuje například při opracování dřeva reznými nástroji (loupání, frézování, soustružení, řezání) a při namáhání na oděr. Jsou rozlišovány dva typy, dle druhu zatížení: statická a dynamická.

Statická tvrdost podle Brinella, spočívá v zatlačování ocelové kuličky do radiální, tangenciální nebo čelní plochy dřeva. Základní hodnoty jsou: vynaložená

síla a průměr vtačované kuličky a jejího otisku ve dřevě (Gandelová, a kol., 2009).

Na Obr. 13 můžeme vidět změnu tvrdosti dřeva borovice v průběhu termické úpravy, a to v rozmezí 100-240 °C. Je patrné, že význam těchto změn není nijak zásadní. Na zvýšené hodnoty tvrdosti má vliv rostoucí podíl krystalické celulózy v důsledku rozkladu amorfních hemicelulóz (Reinprecht a Vidholdová, 2008; ThermoWood Handbook, 2003).



Obr. 13. Znázornění vztahu mezi tvrdostí podle Brinella a teplotou termické modifikace, která probíhala 3 hodiny (ThermoWood Handbook 2003)

4.3.2 Houževnatost

Jedná se o významnou vlastnost charakterizující dřevo. Je to schopnost materiálu odolávat vzniku a šíření trhlin při působení rázového namáhání. K jejímu stanovení je používáno nejčastěji přerážecí Charpyho kladivo. Dřeviny s vysokou rázovou pevností nazýváme houževnaté. Opakem houževnatosti je křehkost. Houževnatá dřeva vytváří vyštípaný, vláknitý zlom, kdežto křehká zlom tupý a schodovitý. Tuto vlastnost ovlivňuje zejména hustota, vlhkost, teplota a odklon vláken daného dřeva (Reinprecht a Vidholdová, 2008)

Houževnatost se obecně v důsledku termické úpravy snižuje, a to různě, v závislosti na procesu termování a použitém druhu dřeva. Dřevo se stává výrazně křehčím (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

5 Metodika měření

Metodiku této bakalářské práce můžeme na základě cílů rozdělit následovně:

1. Příprava zkušebních těles.
2. Značení zkušebních těles.
3. Experimentální měření.
4. Chemická analýza.
5. Vyhodnocování naměřených dat.

Metodika sleduje vliv stupně termické úpravy ($t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=180\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=210\text{ }^{\circ}\text{C}$) na sledované fyzikální a mechanické charakteristiky a na změny v chemické struktuře dřeva mahagonu (*Swietenia mahagoni*):

1. Sledované fyzikální charakteristiky:

- 1.1. Účinek termické úpravy na změny v barevném prostoru (L^* , a^* , b^*)

2. Sledované mechanické charakteristiky:

- 2.1. Účinek termické úpravy na změnu tvrdosti podle Brinella (BH).
- 2.2. Účinek termické úpravy na rázovou houževnatost (MPa).

3. Sledované chemické charakteristiky:

- 3.1. Vliv termické úpravy na procentuální zastoupení chemických komponentů.
- 3.2. Vliv podílu jednotlivých chemických komponentů na změny v barevném prostoru, rázovou houževnatost a tvrdost.

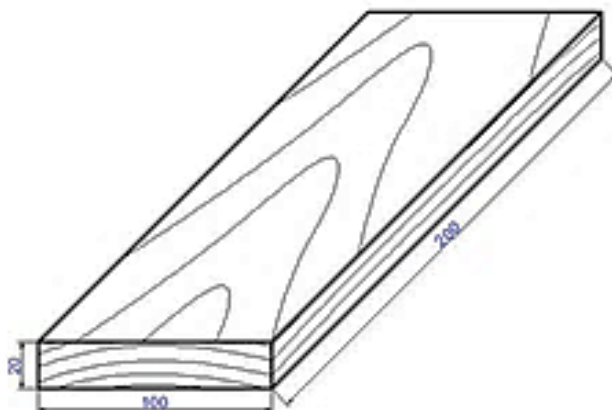
5.1 Příprava zkušebních těles

Všechna měření byla provedena na dřevě mahagonu (*Swietenia mahagoni*).

5.1.1 Termická úprava pro experiment změny barvy

Pro tento experiment byly použity 4 vzorky mahagonu, přičemž každý byl upravený jinou teplotou. Konkrétně se jednalo o referenční (porovnávací) vzorek, termicky upravený teplotou 20 °C. Dále vzorky termicky upravené teplotou 160 °C, 180 °C a 210 °C.

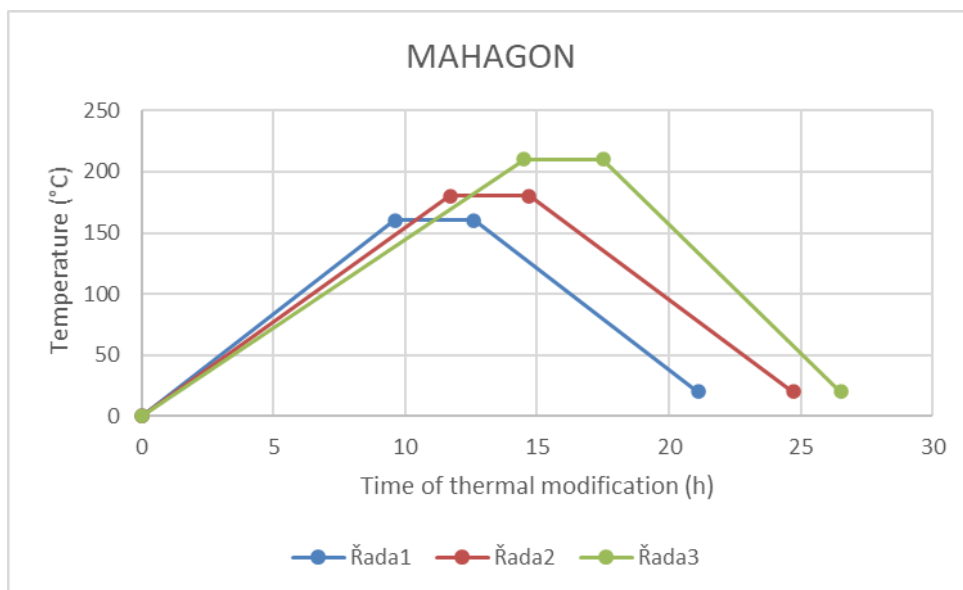
Rozměry zkušebních těles pro posouzení barevné změny, byly 20 x 100 x 200 mm (h x š x l) a byla řezána radiálně, viz (Obr. 14).



Obr. 14. Zkušební těleso pro posouzení barevné změny v důsledku termické úpravy
(Kupsa , 2019)

Během samotné termické modifikace docházelo nejprve k sušení vzorků za pomoci ohřevu horkým vzduchem, kdy se teplota zvýšila přibližně na 100 °C. Tato fáze měla za cíl vysušit dřevo mahagonu na nulovou vlhkost. Další fází byla samotná termická úprava, při níž docházelo ke zvyšování teploty na 160-210 °C, a to po dobu 6,5-11 hodin. Po této fázi následovala stabilizace, za pomoci ochlazení vzorků na teplotu přibližně 50 °C a ustálení konečné vlhkosti vzorků na 4-7 %.

Následující Obr. 15 znázorňuje průběh termické úpravy vzorků mahagonu použitých pro experiment.



Obr. 15. Znázornění průběhu jednotlivých stupňů termické úpravy vzorků mahagonu

(Zdroj: autor)

Tab. 1 obsahuje základní parametry k průběhu termické úpravy mahagonu. Jedná se o popis vstupních parametrů a doby trvání jednotlivých fází úpravy.

Tab. 1. Vstupní technologické parametry a doba termické úpravy vzorků mahagonu

(Zdroj: autor)

Vstupní technologické parametry						
	160 °C (hod)		180 °C (hod)		210 °C (hod)	
Vlhkost dřeva	2 to 4 %					
Kapacita komory	0,8 m ³					
Maximální teplota	210 °C					
Mahagon – proces termické úpravy						
	160 °C (hod)		180 °C (hod)		210 °C (hod)	
Ohřívání	9,6	0-160	11,7	0-180	14,5	0-210
Tepelná úprava	3	160	3	180	3	210
Chlazení	8,5	160-50	9	180-50	10	210-50
Celkový čas úpravy	21,1		23,7		27,5	

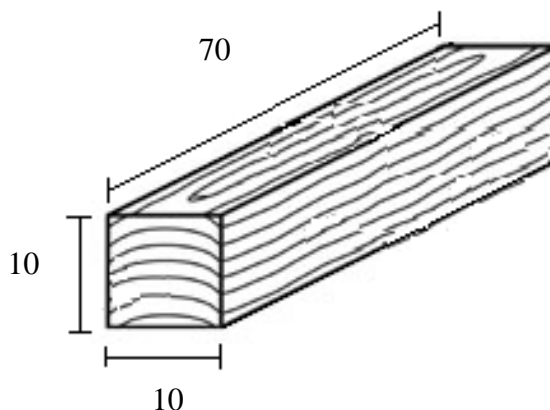
5.1.2 Termická úprava pro experiment změny tvrdosti

Pro tento experiment byly použity stejné vzorky, jako pro posuzování změny barvy (Kap. 5.1.1). Rozměry vzorků, technologie a technologické postupy termické úpravy jsou tedy totožné.

5.1.3 Termická úprava pro experiment změny rázové houževnatosti

Pro vykonání tohoto experimentu bylo zapotřebí 80 vzorků mahagonu, jejichž rozměry byly 10 x 10 x 70 mm (h x š x l) (Obr. 16). Jednalo se o 4 skupiny po 20 vzorcích, přičemž každá byla termicky upravená jinou teplotou, a to konkrétně 20 °C, 160 °C, 180 °C a 210 °C.

Tyto vzorky byly termicky upraveny pomocí stejné technologie a technologických postupů jako vzorky pro posuzování změny barvy (Kap. 5.1.1).



Obr. 16. Zkušební těleso pro experiment změny houževnatosti v důsledku termické úpravy (Zdroj: autor)

5.2 Značení zkušebních těles

Označování zkušebních těles bylo prováděno za účelem zvýšení přehlednosti a prevence proti záměně naměřených výsledků.

5.2.1 Označení zkušebních těles pro experiment barevné změny

Vzorky byly označeny písmeny značícími dřevinu, tedy MH – mahagon. Za nimi následovalo číslo odpovídající stupni termické úpravy (20, 160, 180, 210). Příklad označení: MH-210. Vzhledem k tomu, že každou teplotu reprezentoval jen jeden vzorek, nebylo nutné přidávat další pořadová čísla.

5.2.2 Označení zkušebních těles pro experiment změny tvrdosti

Pro tento experiment byly použity stejné vzorky jako pro experiment barevné změny, jejich označení je tedy totožné.

5.2.3 Označení zkušebních těles pro experiment změny rázové houževnatosti

Označení vzorků bylo stejné jako v předchozích dvou případech, tedy písmenem dřeviny (MH) a příslušnou číslicí reprezentující teplotu termické úpravy (20, 160, 180, 210). V tomto případě bylo nutné přidat pořadová čísla 1-20, kdy každou teplotu úpravy reprezentovalo právě 20 vzorků. Příklad označení: MH-180-14.

5.3 Experimentální měření

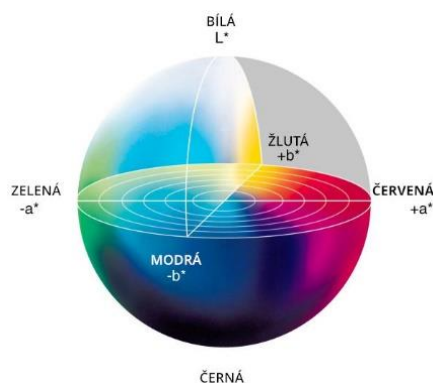
Tato kapitola nám popisuje, jakým způsobem a na jakých strojích byla prováděna jednotlivá měření. Součástí jsou také vzorce pro výpočet sledovaných charakteristik.

5.3.1 Měření účinku termické úpravy na barevné změny

Toto měření bylo prováděno pomocí spektrofotometru Konica Monolta CM-600d. Pomocí něho je možné měřit barevné souřadnice LAB, na základě kterých je možné vypočítat celkovou změnu barvy. Měření probíhá na základně vyhodnocení odražených vlnových délek v rozmezí 400–700 nm. Spektrofotometr má pulzní xenonové výbojky s UV filtrem, jejichž vlnová délka je konstantní. Pozorování je pod úhlem 0° a odražený paprsek světla je v kruhovém vzorci pod 45° úhlem.

Pro toto měření nebylo využito měření před a po termické úpravě, ale jen po termické úpravě. Díky referenčnímu vzorku (20°C), jsme byli schopni zjistit celkové barevné změny ΔE^* pro zbylé teploty úpravy (160°C , 180°C a 210°C). Pro zpřesnění výsledků, probíhalo měření na třech různých místech na každém vzorku mahagonu. Veškerá měření probíhala dle norem: ISO 11664-2 (2007) a ISO 11664-6 (2014).

Pro měření byla použita metoda CIELAB, která využívá barevného prostoru o třech osách (L^* , a^* , b^*) (Obr. 17). Na základě těchto souřadnic je možné vypočítat celkovou změnu barvy (Cividini a kol., 2007).



Obr. 17. Znáznornění barevného prostoru pro metodu CIE L*a*b* (www.sony.cz)

- L* - vyjádření jasů v % (0 % černá, 100% bílá)
- a* - souřadnice s odstínem mezi zelenou a červenou; od +60 do -60
- b* - souřadnice s odstínem mezi žlutou a modrou; od +60 do -60

(Sehlstedt-Persson, 2003)

Podle velikosti hodnoty ΔE^* rozlišujeme následující rozdíly v barevné změně:

Tab. 2. Přehled hodnot parametru ΔE^* a jeho dopad na změnu barvy (Zdroj: autor)

$0,2 > \Delta E^*$	Neviditelný rozdíl
$0,2 < \Delta E^* < 2$	Malý rozdíl
$2 < \Delta E^* < 3$	Barevná změna viditelná s vysoce kvalitním filtrem
$3 < \Delta E^* < 6$	Barevná změna viditelná se středně kvalitním filtrem
$6 < \Delta E^* < 12$	Vysoké barevné změny
$\Delta E^* > 12$	Odlišná barva

Celková barevná změna se vypočítala z následujícího vzorce, za pomoci změn parametrů L*, a*, b* před a po termické modifikaci. K vypočítání jejich změny nám posloužil referenční vzorek mahagonu (20 °C).

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}} \quad (1)$$

ΔE^* - celková změna barvy

ΔL^* , Δa^* a Δb^* - jedná se o rozdíl dané hodnoty u referenčního (index 1) vzorku a vzorku termicky upraveného (indexy 2, 3, 4). K výpočtu jsme použili následující vzorec (Sehlstedt-Persson, 2003):

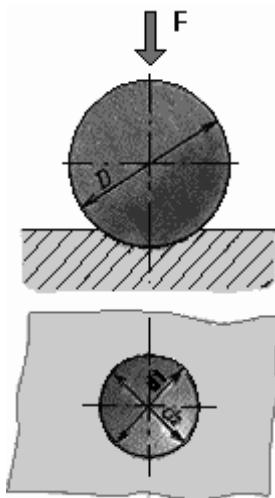
$$\begin{aligned}\Delta L^* &= L2^* - L1^*, L3^* - L1^*, L4^* - L1^* \\ \Delta a^* &= a2^* - a1^*, a3^* - a1^*, a4^* - a1^* \\ \Delta b^* &= b2^* - b1^*, b3^* - b1^*, b4^* - b1^*\end{aligned}\tag{2}$$

5.3.2 Měření účinku termické úpravy na tvrdost

Zkouška měření tvrdosti byla provedena na tvrdoměru Duravision-30 podle Brinella. Prvním krokem byla příprava vzorků, na který jsme nakreslili mřížku s rozestupy 20 x 20 mm V místech, kde se čáry protínaly bylo vykonáno měření, a to 20x pro každý vzorek. Dále byly na tvrdoměru nastaveny parametry pro měření.

Samotné měření začalo upnutím vzorku do tvrdoměru a spuštěním měření na dotykovém displeji. V prvních 15 sekundách došlo ke vtisku indikátoru do vzorku a zpravidla do 1 minuty proběhlo na displeji i vyhodnocení tvrdosti, jež byla v MPa. Tyto hodnoty jsme zapisovaly do tabulky, zvlášť pro každý stupeň modifikace. Po vyhodnocení byl vzorek posunut, pro zpřesnění výsledků a měření probíhalo sejným způsobem znovu.

Indikátorem byla kulička, (Obr. 18) jejíž odpor proti vtláčení, průměr a hloubku otláčení přístroj zaznamenává a následně je schopen vypočítat tvrdost materiálu.



Obr. 18. Měření tvrdost podle Brinella (<http://www.converter.cz>)

Tvrdość vzorků, podle Brinella, byla vypočítána za použití následujícího vzorce a této normy EN 1534 (2020):

$$H_{BW} = \frac{2F}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (3)$$

kde:

H_{BW} – Tvrdość dřeva podle Brinella (Mpa),

F – síla působící na kuličku (N),

D – průměr kuličky (mm),

d – průměr otláčené plochy ve dřevě (mm).

Vzorky byly klimatizovány v komoře Weiss Umwelttechnik GmbH typu Clime Event C/2000/40/3, při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %, z toho důvodu nebylo nutné přepočítávat tvrdość na 12% vlhkost.

5.3.3 Měření účinku termické úpravy na rázovou houževnatost

Prvním krokem měření bylo změření přesných rozměrů všech 80 vzorků v radiálním a tangenciálním směru, a to vždy na krajích a uprostřed vzorku. To bylo nutné také díky částečné změně rozměrů během termické úpravy. Měření probíhalo pomocí digitálního posuvného měřítka, jež zaznamenávalo naměřené hodnoty do excelové tabulky.

Následujícím krokem byla samotná zkouška rázové houževnatosti, její měření probíhalo na Instronu MPX se softwarem Bluehill Impact (Obr. 19) podle standardů Charpyho. Tento stroj splňuje následující normy: ISO 148 (2017), GOST 9454 (2017), AS 1544 (2017), JIS Z 2242 (2018), JIS B 7722 (2018) (www.instron.us). Jeho účelem je vytvoření rázového namáhání, pomocí úderu kladiva, otočného kolem jedné osy. Zdvihnutím kladivu dodáme požadovanou potenciální energii a jeho uvolněním jí přeměníme na kinetickou, jejíž maximum je ve spodní části trajektorie jeho pohybu, kam umístíme zkušební vzorky. Při umístování jsme použili pomocné kleště a pokládali vzorky tak, aby kladivo narazilo na radiální plochu.

Z hodnoty úbytku kinetické energie bylo systémem vyhodnoceno množství energie v joulech, kterou těleso pro přeražení absorbovalo.



Obr. 19. Instron MPX pro měření rázové houževnatosti (www.instron.us)

Naměřené hodnoty jsme zaznamenávali do excelové tabulky pro jejich pozdější statistické vyhodnocení.

Pro výpočet rázové houževnatosti byl použit tento vzorec:

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} \quad [J \cdot cm^{-2}] \quad (4)$$

kde:

A_w – rázová houževnatost,

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa (J),

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

(Požgaj a kol., 1993).

Vzorky byly klimatizovány v komoře Weiss Umwelttechnik GmbH typu Clime Event C/2000/40/3, při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %, z toho důvodu nebylo nutné přepočítávat tvrdost na 12% vlhkost.

5.4 Chemická analýza

Chemickou analýzu pro jednotlivé stupně termické úpravy provedl pan profesor František Kačík na technické univerzitě ve Zvoleně.

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

5.5 Vyhodnocování naměřených dat

Pro zpracování dat z chemické analýzy a experimentálních měření byl využit software Statistica 12. Zde byl data statisticky vyhodnocena za použití vícefaktorové analýzy rozptylu. Jejím cílem je zhodnotit účinky jednotlivých faktorů a jejich dvou, tří nebo čtyř vzájemných kombinací. Pro ohodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemných kombinací byl použit Fisherův F-test, s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Ten na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Ohodnocení sledovaného faktoru probíhá na základě velikosti hodnoty parametru P takto:

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

Vyhodnocení dat z chemické analýzy bylo provedeno pomocí koeficientu korelace r . Ten nám poukazuje na těsnost vztahu mezi dvěma proměnnými. Pro vyhodnocení těsnosti výsledků jsme použili hodnoty koeficientu determinace r^2 :

- $r^2 < 10\%$ - nízká závislost,
- $10\% \leq r^2 < 25\%$ - mírná závislost,
- $25\% \leq r^2 < 50\%$ - významná závislost,
- $50\% \leq r^2 < 80\%$ - vysoká závislost,
- $80\% \leq r^2$ - velmi vysoká závislost (Corleto, R., Gaff, M., a kol. 2020).

6 Výsledky a vyhodnocení

V této kapitole jsou přehledně shrnuty výsledky z chemické analýzy (Kap. 6.1) a experimentálních měření (změna barvy, tvrdost, houževnatost) (Kap. 6.2, 6.3 a 6.3.1). Jedná se o tabulky či grafy, zobrazující interakce mezi jednotlivými faktory. Pro jejich vyhodnocení používáme parametr P a koeficient korelace r.

6.1 Vliv termické úpravy na změny v chemickém složení

Průměrné hodnoty chemických komponentů a variační koeficienty, pro jednotlivé stupně termické úpravy, i pro neupravený mahagon, jsou uvedeny v Tab. 3.

Můžeme vidět, že vzrostlo procentuální zastoupení extraktivních látek, ligninu, celulózy a významně klesl podíl hemicelulóz a holocelulóz.

Tab. 3. Průměrné hodnoty chemického složení dřeva mahagonu u jednotlivých stupňů termické úpravy (Zdroj: autor)

TM (°C)	Extraktivní látky (%)	CV (%)	Lignin (%)	CV (%)	Holocelulóza (%)	CV (%)	Celulóza (%)	CV (%)	Hemicelulóza (%)	CV (%)
20	7,96	1,38	24,82	1,19	68,40	0,53	45,31	0,44	23,09	1,98
160	8,14	2,17	25,43	1,42	67,37	0,46	45,95	0,62	21,41	1,62
180	11,40	1,48	27,54	1,30	61,45	0,47	47,42	0,71	14,03	0,78
210	13,52	1,36	31,58	0,91	54,50	0,59	49,47	0,48	5,03	10,69

VC – variační koeficient

Z velikosti parametru P v Tab. 4 vyplývá, že u všech sledovaných charakteristik (extraktivní látky, lignin, holocelulóza, celulóza, hemicelulóza), se projevil statisticky velmi významný vliv termické modifikace.

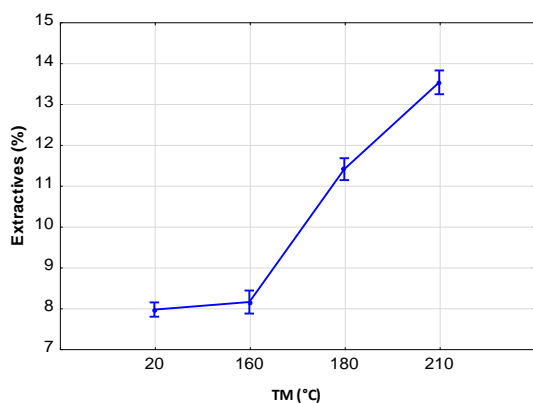
Tab. 4. Jedno faktorová analýza rozptylu hodnotící účinek teploty na hodnoty změn chemických komponentů (Zdroj: autor)

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Extraktivní látky (%)					
Intercepce	1682,230	1	1682,230	63993,54	0,000000
TM (°C)	86,804	3	28,935	1100,70	0,000000
Chyba	0,315	12	0,026		

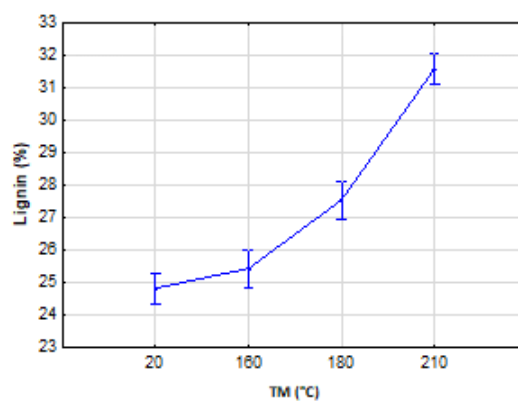
Sledovaný	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Lignin (%)					
Intercepce	11961,80	1	11961,80	111788,1	0,000000
TM (°C)	111,81	3	37,27	348,3	0,000000
Chyba	1,28	12	0,11		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Holocelulóza (%)					
Intercepce	63359,18	1	63359,18	611046,7	0,000000
TM (°C)	491,55	3	163,85	1580,2	0,000000
Chyba	1,24	12	0,10		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Celulóza (%)					
Intercepce	35400,42	1	35400,42	487189,7	0,000000
TM (°C)	40,85	3	13,62	187,4	0,000000
Chyba	0,87	12	0,07		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Hemicelulóza (%)					
Intercepce	4040,191	1	4040,191	25579,94	0,000000
TM (°C)	814,950	3	271,650	1719,92	0,000000
Chyba	1,895	12	0,158		

Následující grafy přehledněji popisují změnu procentuálního zastoupení extraktivních látek, ligninu, holocelulózy, celulózy a hemicelulózy v důsledku termické úpravy dřeva mahagonu.

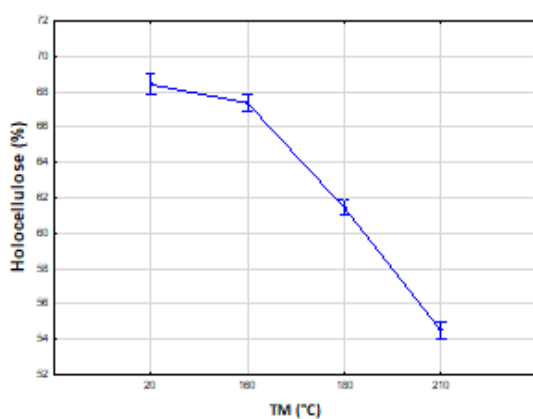
V důsledku termické úpravy dochází k nárůstu procentuálního zastoupení extraktivních látek, ligninu a celulózy a k poklesu procentuálního zastoupení hemicelulózy a holocelulózy. Nejvyšší pokles byl zaznamenán u hemicelulóz, a to přibližně o 18 %, jak můžeme vidět z Obr. 24. Obecně lze říct, že k nejvýznamnějším změnám v chemické struktuře docházelo při zahřátí dřeva ze 180 na 210 °C, kromě složky extraktivních látek. Ty zaznamenaly největší nárůst při zahřátí ze 160 na 180 °C (Obr. 20).



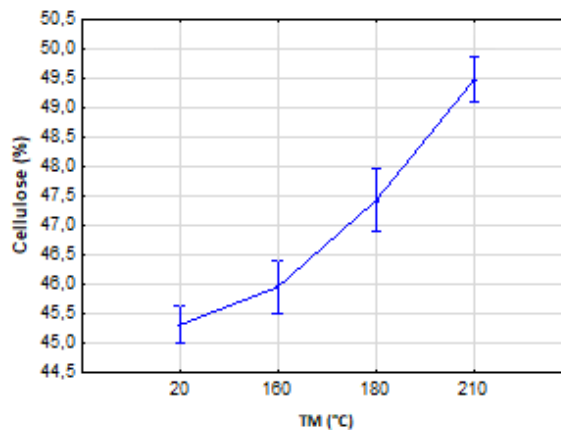
Obr. 20. Změna % zastoupení extraktivních látek v závislosti na termické úpravě (Zdroj: autor)



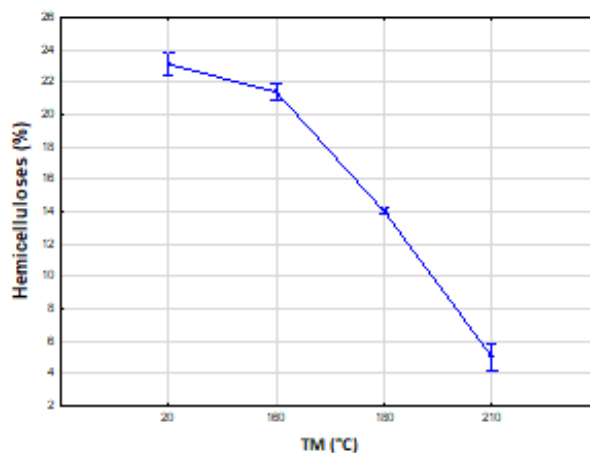
Obr. 21. Změna % zastoupení ligninu v závislosti na termické úpravě (Zdroj: autor)



Obr. 22. Změna % zastoupení holocelulózy v závislosti na termické úpravě (Zdroj: autor)



Obr. 23. Změna % zastoupení celulózy v závislosti na termické úpravě (Zdroj: autor)



Obr. 24. Změna % zastoupení hemicelulózy v závislosti na termické úpravě (Zdroj: autor)

6.2 Vliv termické úpravy na barevné změny

U výsledků barevné změny byl posuzován vliv termické úpravy na celkovou změnu barvy ΔE^* , vypočítanou z naměřených hodnot parametrů L^* , a^* a b^* (Tab. 5). Dále jsme hodnotili korelaci mezi touto charakteristikou a procentuálním zastoupením chemických komponentů.

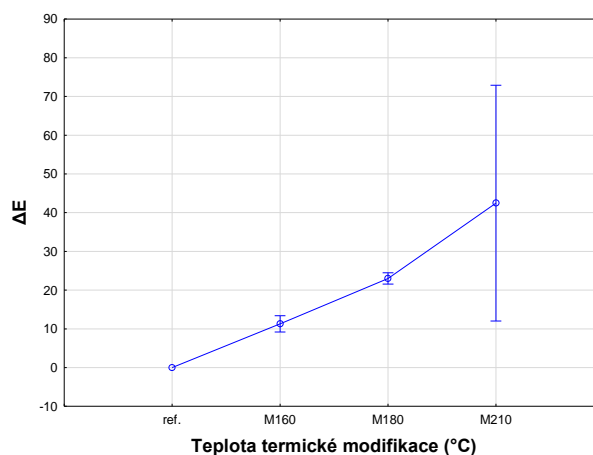
Tab. 5. Naměřené hodnoty L^* , a^* a b^* pro jednotlivé teploty termické úpravy
(Zdroj: autor)

MAHAGON	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
ref. (20 °C)	51,4	12,44	20,81	50,94	12,48	20,56	51,22	12,24	20,21
160 °C	41,17	14,79	20,59	39,04	14,73	19,24	40,26	14,31	19,32
180 °C	29,34	13,27	16,65	28,31	12,7	16,71	27,84	12,89	16,77
210 °C	17,79	4,54	5,86	21,02	5,7	7,4	20,05	5,76	7,97

Z Tab. 6, je na základě hodnoty hladiny významnosti P, které je menší než 0,001, zřejmé, že daný faktor velmi působí. Zvyšující se hodnoty jsou patrné z Obr. 25.

Tab. 6. Statistická významnost vlivu termické modifikace na parametr ΔE^*
(Zdroj: autor)

	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepce	4421,542	1	4421,542	116,9532	0,000005
Teplota úpravy (°C)	2962,008	3	987,336	26,1158	0,000174
Chyba	302,449	8	37,806		



Obr. 25. Vliv teploty termické modifikace na parametr ΔE^* (Zdroj: autor)

Tab. 7. Statistická významnost vlivu teploty termické modifikace na parametr ΔE^*

(Zdroj: autor)

Duncan test; variable ΔE (Tabulka1)					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = 37,806, df = 8,0000					
	Teplota úpravy (°C)	(1) 0,00	(2) 11,29	(3) 23,02	(4) 42,471
1	ref.		0,05	0,00	0,000111
2	Mah.160	0,05		0,05	0,000414
3	Mah.180	0,002323	0,05		0,004871
4	Mah.210	0,000111	0,0004871	0,004871	

Hodnota parametru P při porovnání referenčního vzorku a vzorku upraveného teplotou 160 °C je 0,05, tedy je na hranici statistické významnosti a nemůžeme říct, zda daný faktor je či není statisticky významný. Pro posouzení by bylo třeba doplnit další měření. Stejná hodnota je také mezi 2. a 3. stupněm termické úpravy.

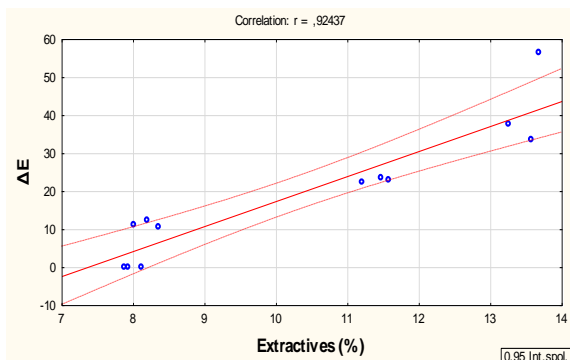
Statisticky významný vliv, kdy faktor působí, se projevuje při porovnání referenční hodnoty s 3. a 4. stupněm termické úpravy.

K nejvýraznější změně dochází při úpravě 210 °C, což je patrné i z grafu. Lze tedy říct, že se zvyšováním teploty nad 160 °C dochází ke statisticky významným barevným změnám.

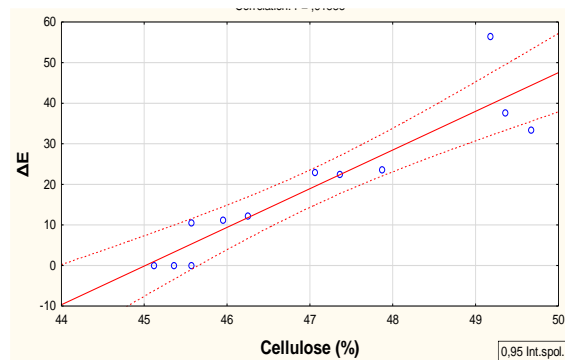
Korelace

V následujících grafech můžeme vidět korelace mezi celkovou změnou barvy ΔE^* a chemickými komponenty, na základě čehož můžeme posoudit o těsnosti výsledků. U této charakteristiky se projevila velmi vysoká závislost na všech chemických komponentech ($r > 90\%$).

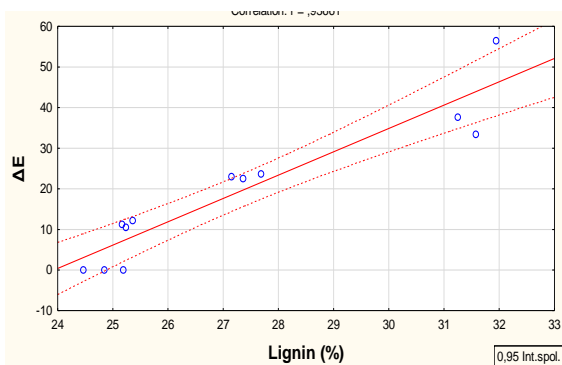
Hodnota sledované charakteristiky změna barvy roste, v důsledku rostoucího podílu extraktivních látek (Obr. 26), ligninu (Obr. 27) a celulózy (Obr. 28) a klesá v důsledku rostoucího podílu holocelulózy (Obr. 30) a hemicelulózy (Obr. 29). V konečném výsledku změna barvy roste, viz Obr. 25 a Tab. 7.



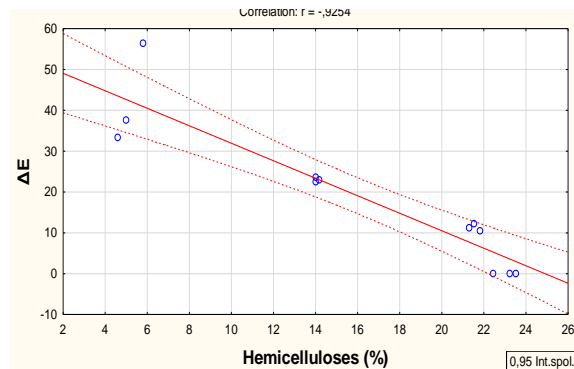
Obr. 26. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením extraktivních látek (Zdroj: autor)



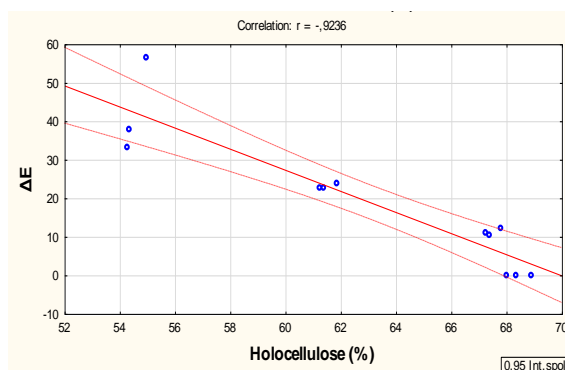
Obr. 28. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením celulózy (Zdroj: autor)



Obr. 27. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením ligninu (Zdroj: autor)



Obr. 29. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením hemicelulózy (Zdroj: autor)



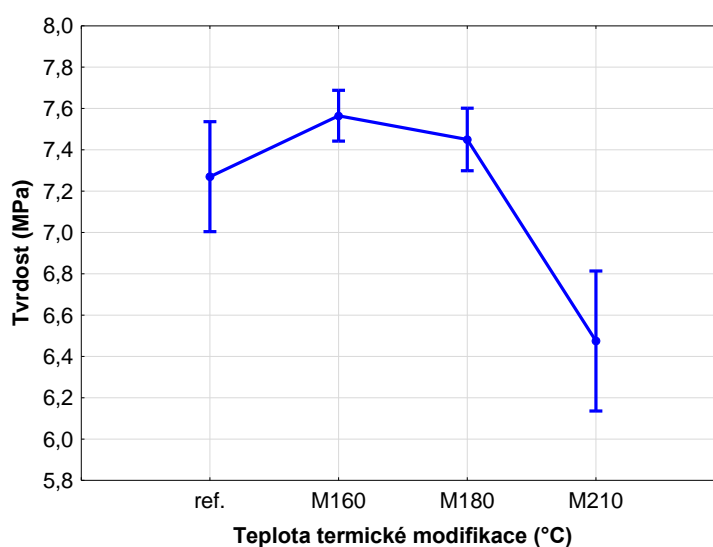
Obr. 30. Korelace mezi celkovou změnou barvy a % zastoupením holocelulózy (Zdroj: autor)

6.3 Vliv termické úpravy na změnu tvrdosti

Na základě hodnoty hladiny významnosti P můžeme konstatovat, že daný faktor působí na změnu tvrdosti dřeva, což je patrné z Tab. 8.

Tab. 8. Statistická významnost vlivu termické modifikace na parametr tvrdosti
(Zdroj: autor)

	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepce	4135,688	1	4135,688	16205,84	0,000000
Teplota úpravy (°C)	14,517	3	4,839	18,96	0,000000
Chyba	19,395	76	0,255		



Obr. 31. Vliv teploty termické modifikace na tvrdost (Zdroj: autor)

Při porovnání tvrdosti referenčního vzorku a vzorků upravených teplotou 160 °C a 180 °C vidíme z Obr. 31, že nedošlo ke statisticky významnému rozdílu tvrdosti. Hodnoty tvrdosti při termické úpravě 160 °C a 180 °C jsou nepatrně vyšší, ale přírůstky nejsou statisticky významné. Statisticky významná je změna tvrdosti působením teploty 210 °C, kdy dochází k jejímu poklesu, což vidíme viz Obr. 31. Z tabulky Duncanova testu (

Tab. 9), i z grafu, je patrné, že hodnota tvrdosti při úpravě teplotou 210 °C se statisticky velmi liší od zbylých tří hodnot čili faktor působí.

Tab. 9. Statistická významnost vlivu teploty termické modifikace na parametr tvrdosti

(Zdroj: autor)

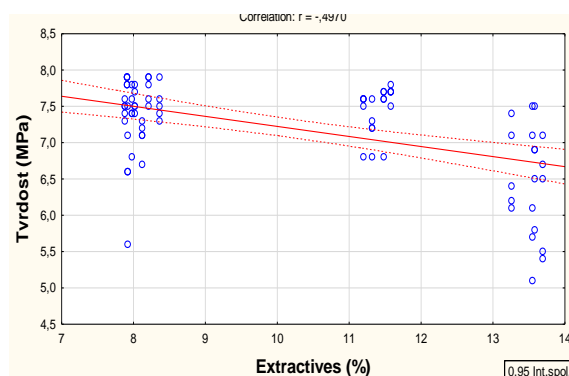
Duncan test; variable Tvrdost (MPa) (tvrdost)					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = ,25520, df = 76,000					
	Teplota úpravy (°C)	(1)	(2)	(3)	(4)
		7,27	7,56	7,45	8,47
1	ref.		0,08	0,26	0,00
2	Mah.160	0,08		0,47	0,00
3	Mah.180	0,26	0,47		0,00
4	Mah.210	0,00	0,00	0,00	

Korelace

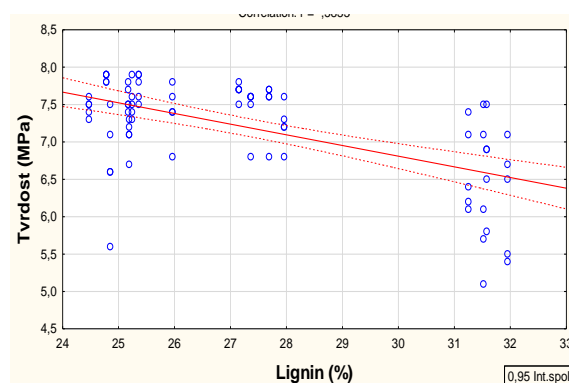
Následující grafy znázorňují korelaci mezi tvrdostí a procentuálním zastoupením chemických komponentů, na základě čehož můžeme posoudit o těsnosti výsledků.

Mírná závislost je patrná mezi tvrdostí a extraktivními látkami, kdy koeficient korelace r je menší než 50 %. U ostatních chemických komponentů se hodnota koeficientu pohybuje mezi 51 až 58 %, což značí významnou závislost.

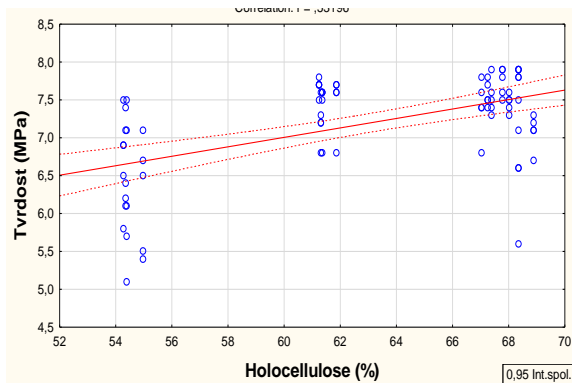
Obecně můžeme říct, že tvrdost roste s rostoucím podílem holocelulózy (Obr. 34) a hemicelulózy (Obr. 36) a klesá s rostoucím podílem extraktivních látek (Obr. 32), ligninu (Obr. 33) a celulózy (Obr. 35). V konečném důsledku tvrdost při vyšších teplotách úpravy klesá, což je patrné z Obr. 31.



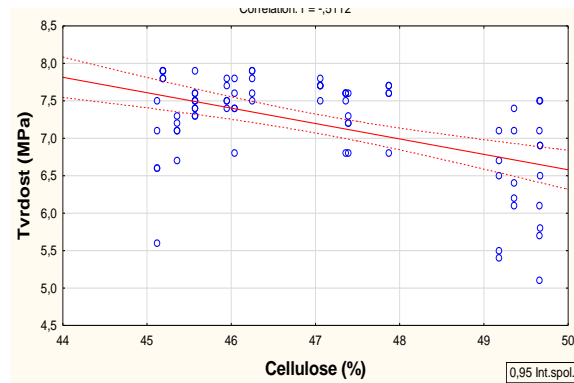
Obr. 32. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením extraktivních látek (Zdroj: autor)



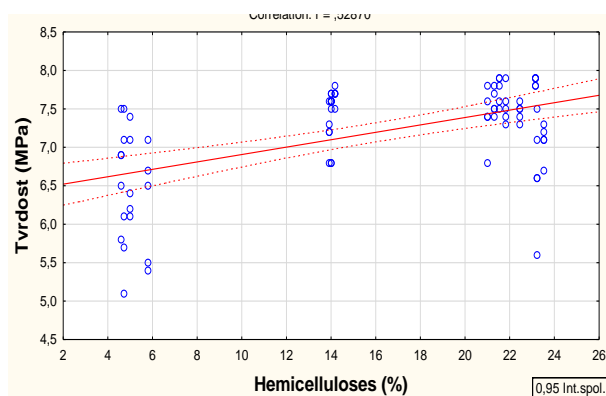
Obr. 33. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením ligninu (Zdroj: autor)



Obr. 34. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením holocelulóz (Zdroj: autor)



Obr. 35. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením celulóů (Zdroj: autor)



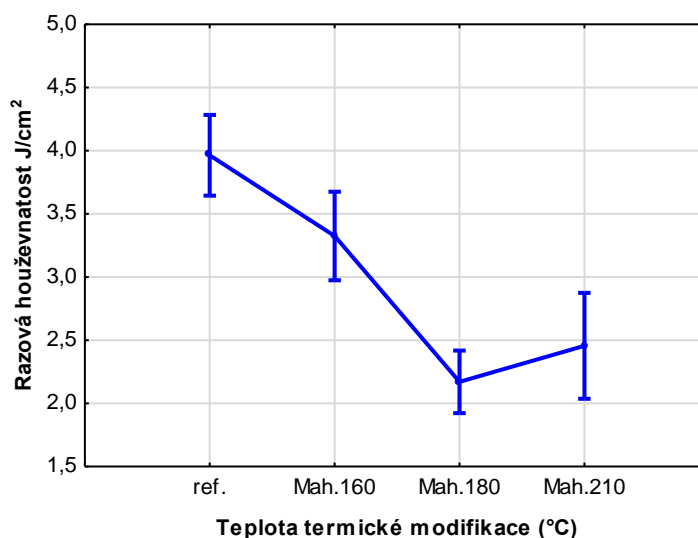
Obr. 36. Korelace mezi tvrdostí a % zastoupením hemicelulóz (Zdroj: autor)

6.3.1 Vliv termické úpravy na změnu rázové houževnatosti

Na základě hodnoty hladiny významnosti P můžeme konstatovat, že daný faktor působí na změnu houževnatosti dřeva, což je patrné z Tab. 10.

Tab. 10. Statistická významnost vlivu termické modifikace na parametr houževnatosti

	SS	Degr. of Freedom	MS	F	P
Intercepce	532,3413	1	532,3413	1413,993	0,000000
Teplota úpravy (°C)	30,2420	3	10,0807	26,776	0,000000
Chyba	21,0829	56	0,3765		



Obr. 37. Vliv teploty termické modifikace na parametr houževnatost (Zdroj: autor)

Mezi referenčním vzorkem a 1. stupněm termické úpravy je malá statistická významnost vlivu, ale faktor působí. V ostatních případech je vliv faktoru vzhledem k referenčnímu vzorku velmi statisticky významný (Tab. 11) a dochází k výraznějšímu poklesu rázové houževnatosti. Ze 3. do 4. stupně její hodnoty nepatrně rostou (Obr. 37), ale to pro nás není statisticky významné.

V důsledku termické modifikace dochází k poklesu rázové houževnatosti, a to nejvýrazněji od teploty 160 °C.

Tab. 11 . Statistická významnost vlivu teploty termické modifikace na parametr rázové houževnatosti (Zdroj: autor)

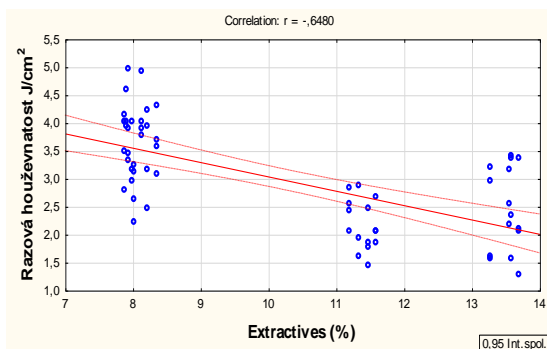
Duncan test; variable Razová houževnatost J/cm² (Raz)					
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests					
Error: Between MS = ,37648, df = 56,000					
	Teplota úpravy (°C)	(1)	(2)	(3)	(4)
		3,93	3,32	2,17	2,45
1	ref.		0,01	0,00	0,00
2	Mah.160	0,01		0,00	0,00
3	Mah.180	0,00	0,00		0,21
4	Mah.210	0,00	0,00	0,21	

Korelace

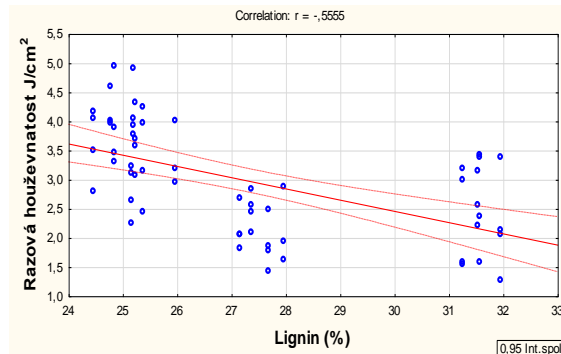
Grafy níže nám popisují korelaci mezi rázovou houževnatostí a procentuálním zastoupením chemických komponentů, na základě čehož můžeme posoudit o těsnosti výsledků.

Ve všech případech se jedná o významnou závislost, kdy koeficient korelace nabývá hodnot od 55 do 65 %.

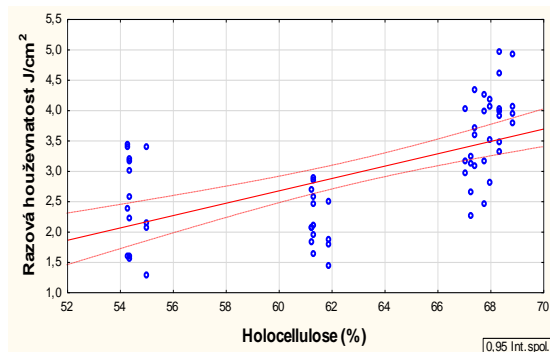
Rázová houževnatost roste s rostoucím podílem holocelulóz (Obr. 40) a hemicelulóz (Obr. 42) a klesá s rostoucím podílem extraktivních látek (Obr. 38), ligninu (Obr. 39) a celulózy (Obr. 41), což převažuje a v důsledku toho její hodnoty klesají (Obr. 37).



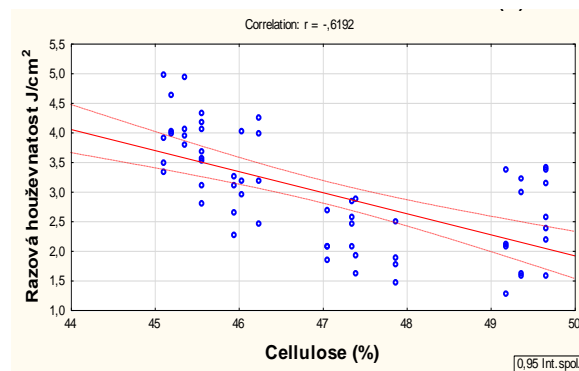
Obr. 38. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením extraktivních látek (Zdroj: autor)



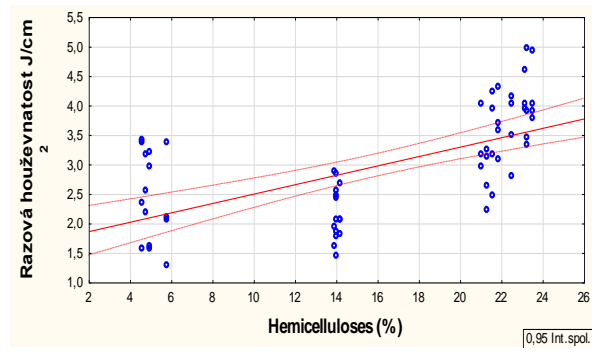
Obr. 39. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením ligninu (Zdroj: autor)



Obr. 40. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením holocelulózy (Zdroj: autor)



Obr. 41. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením celulózy (Zdroj: autor)



Obr. 42. Korelace mezi rázovou houževnatostí a % zastoupením hemicelulóz (Zdroj: autor)

Závěr

Hlavními cíli této bakalářské práce bylo zjištění účinku teploty termické modifikace na změny v základních chemických komponentech mahagonu (celulóza, lignin, hemicelulóza, holocelulóza, extraktivní látky) a vlivu těchto změn na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti (barva, tvrdost, rázová houževnatost). Toto vše mělo být zjištěno pomocí experimentů a následného vyhodnocení naměřených dat.

Pro zpřehlednění nejdůležitějších výsledků je využito jejich rozdělení na jednotlivé námi sledované charakteristiky.

1. Chemické složení dřeva:

- s rostoucí teplotou klesá podíl hemicelulóz a holocelulóz a roste podíl extraktivních látek, ligninu a celulózy;
- termická modifikace má statisticky velmi významný vliv na změnu procentuálního zastoupení všech chemických komponentů.

2. Změna barvy:

- zvyšováním teploty dochází k barevným změnám a od teploty 160 °C začínají být tyto změny statisticky významné. Největší změnu způsobuje teplota 210 °C;
- celková změna barvy je vysoce závislá na změně procentuálního zastoupení všech chemických komponentů;
- celková změna barvy roste s rostoucím podílem extraktivních látek, ligninu a celulózy.

3. Změna tvrdosti:

- statisticky výrazný pokles tvrdosti vůči referenčnímu vzorku (o 8 MPa), nastává až při teplotě 210 °C;
- její pokles při této teplotě je způsoben nárůstem procentuálního zastoupením extraktivních látek (o 5,5 %), ligninu (o 6,5 %) a celulózy (o 4 %). Můžeme tedy také říct, že klesá v důsledku procentuálního úbytku holocelulózy (o 14 %) a hemicelulózy (o 18 %);
- nejmenší míra závislosti je mezi tvrdostí a extraktivními látkami.

4. Změna houževnatosti:

- nejvýraznější pokles rázové houževnatosti nastává okolo teploty 180 °C;
- změna houževnatosti je významně závislá na procentuálním zastoupení všech chemických komponentů;
- pokles rázové houževnatosti při úpravě teplotou 180 °C souvisí s nárůstem procentuálního zastoupením extraktivních látek (o 3,5 %), ligninu (o 2,5 % a celulózy (o 2 %). Vliv na nárůst houževnatost, má naopak rostoucí podíl holocelulózy a hemicelulózy.

Z těchto poznatků je zřejmé, že na tvrdost a rázovou houževnatost dřeva mahagonu mají podobný vliv stejné chemické komponenty. Obě tyto charakteristiky při vyšších teplotách klesají, v důsledku rostoucího podílu extraktivních látek, ligninu a celulózy (klesajícího podílu holocelulózy a hemicelulózy).

Porovnání:

Dřevo akátu, termicky upravené stejným způsobem a teplotami, projevuje v porovnání s mahagonem větší barevné změny při termické úpravě 160 °C. V dalších stupních (180 °C a 210 °C), v porovnání s předchozím stupněm úpravy, dochází k vyšším změnám barvy u mahagonu. Celková změna barvy je vyšší u akátu (Kupsa, 2019).

Při porovnání celkové změny barvy mahagonu s tropickou dřevinou iroko zjistíme, že pro jednotlivé teploty dochází k velmi podobným změnám. Při konečném porovnání je barevná změna mahagonu nepatrně vyšší. Oproti dřevu padouku je tento rozdíl ještě výraznější (Moscovciuc, 2020).

Přínos pro vědu a praxi:

Potenciální využití termicky upraveného mahagonu je pro estetické účely, kdy dochází k jeho výraznému ztmavnutí, jež se zvyšuje spolu s teplotou termické úpravy. Možné využití těchto změn je například pro výrobu módních dřevěných doplňků, či tvorbu pestrých intarzií na luxusním nábytku.

Pro námi sledované mechanické charakteristiky (tvrdost, houževnatost), nedochází v důsledku termické úpravy k jejich zlepšení. Oproti neupravenému mahagonu pozorujeme zlepšení jen v mírném zvýšení tvrdosti (o 2-3 MPa), při termické

úpravě teplotou 160 °C. Tohoto zvýšení je možné využít například při jeho estetickém využití pro výrobu desek stolů u luxusního nábytku, či dalších prvků, vyžadujících zvýšenou odolnost vůči oděru.

Přepokládaným zlepšením je například snížení hygroskopicity a zvýšení odolnosti vůči biologickým škůdcům, které můžeme očekávat v důsledku výrazného poklesu zastoupení hemicelulóz (o 18 %). Pro konkrétnější zhodnocení změn v těchto vlastnostech je ale zapotřebí dalších experimentálních měření.

Seznam použité literatury

Armines. *Procédé de fabrication dun matériau ligno-cellulosique par traitement thermique et matéria obtenu par ce procédé*, 1986. French Patent, No 86 14 138.

AS 1544. Metody rázových zkoušek na kovech Kalibrace zkušebního stroje. Standardy Austrálie, 2017. 19 s.

Bourgois, J., Bartholin, M.C. and Guyonnet, R. *Thermal treatment of wood: analysis of the obtained product*. Wood Science and Technology, 1989. 23(4), s. 303–310.

Cividini, R., Travan, L. a Allegretti, O. *White beech: a tricky problem in drying process*. Québec City: International Scientific Conference on Hardwood, 2007.

conVERTER. *Zkouška tvrdosti podle Brinella* [online]. [cit. 2021-02-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-brinell.htm>>

Corleto, R., Gaff, M., Niemz, P. a kol. Effect of thermal modification on properties and milling behaviour of African padauk (*Pterocarpus soyauxii* Taub.) wood. *Science Direct* [online]. 2020-06-04 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z WWW: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420314198>>. ISSN 2238-7854

Ellwood, E. A., Eckladn, B. A. *Bacterial attack of pine logs in pond storage*. Forest Product Journal 9(9), 1959. s. 283-292.

EN 1534. Dřevěné podlahy a parkety. Stanovení odolnosti proti vtačení. Testovací metoda Brinell. ICS, 2020. 14 s.

Fengel, D. and Wegener, G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Walter De Gruyter, Berlin, 1989, Germany.

Gaff, M. a Gáborík, J. *Vlastnosti povrchu dřeva modifikovaného reliéfováním*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009.

Gandelová, L., Horáček, P. a Šlezingerová, J. *Nauka o dřevě*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. 978-80-7375-312-2.

Goroyias, G. J. and Hale, M. D. *Heat treatment of wood strands for OSB production: effect on the mechanical properties, water absorption and dimensional stability*. International Research Group on Wood Preservation, 2002. Doc. No. IRG/WP 02-40238.

GOST 9454. Zkušební metoda rázové pevnosti při nízkých, pokojových a zvýšených teplotách (s pozměňovacími návrhy č. 1, 2). Ministerstvo metalurgie a železa SSSR, 2017.

Gustav Reyes Natural Wood Jewelry. [cit. 2021-03-12]. Dostupné z WWW: <<https://www.trendhunter.com/trends/gustav-reyes-natural-wood-jewelry>>

Hanger, J., Huber, H., Lackner, R., Wimmer, R. and Fellner, J. *Improving the natural durability of heat-treated spruce, pine and beech.* *Holzforschung und Holzverwertung*, 54(5), 92–93. Hansmann, C., S. 2002.

HILL, Callum A. S. *Wood modification: chemical, thermal and other processes.* John Wiley & Sons Ltd, Chichester UK, 2006. 239 s. ISBN 0-470-02172-1.

INSTRON®. *MPX Series Motorized Pendulum Impact Testing System – Instron* [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z WWW: <<https://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/impact-systems/pendulums/mpx-pendulum>>

International Job Company s.r.o. *Mobilní domy Kolín* [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z WWW: <<https://www.mobilnidomy-kolin.cz/uvod-1>>

ISO / CIE 11664-6. Kolorimetrie – Část 6: Vzorec pro barevný rozdíl CIEDE2000. CIE mezinárodní komise pro osvětlení, 2014. 9 s.

ISO 11664-2. Colorimetry — Part 2: CIE standard illuminants. CIE mezinárodní komise pro osvětlení, 2007. 14 s.

ISO 148-1. Kovové materiály – Zkouška rázem metodou Charpy – Část 1: Zkušební metoda. 2017. 32 s.

JIS B 7722. Kovové materiály – Charpyho nárazová zkouška kyvadlem - Ověření zkušebních strojů. Japanese Standards Association (JSA), 2018.

JIS Z 2242. PENDULUM – působ zkoušky nárazu kovových materiálů. Japanese Standards Association (JSA), 2018. 48 s.

Joleková, E., Reinprecht, L., Libiaková, A., Korytářová, O., Galádová, M. *Farbenie dreva hubou *Ceratostomella pilifera*.* *Acta Facultatis Xylogie Zvolen* (2), 1996. s. 15-23.

Jones D, Suttie E, Ala-Vikari J, Bergstorm N, Mayes D. *The commercialisation of ThermoWood® products.* 2006. 10 s. IRG/WP/06-40339.

Kacikova, D., Kacik, F., Cabalova, I., and Durkovic, J. „*Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood,*“ *Bioresource Technology* 144, 669. 2013. DOI 10.1016/j.biortech.2013.06.110

Kačík, F., Kačíková, D., Giertlová Z. *Chemical and physico-chemical changes of lignin cellulose and hemicellulose during thermal degradation of wood.* In: *Wood and fire safety*, TU Zvolen, 2000. s. 143-150.

Kafka E. a kol. *Dřevařská příručka část 1.* 1989. SNTL Praha. 484 s.

Kamden, D. P., Pizzi, A. and Jermannaud, A. *Durability of heat-treated wood.* *Holz als Roh und Werkstoff*, 60(1), 2002. 1–6

Kim, D.-Y., Nishiyama, Y., Wada, M., Kuga, S. and Okano, T. *Thermal decomposition of cellulose crystallites in wood.* *Holzforchung*, 2001. 55(5), s. 521–524.

Koleda, P., Barčík, Š., Nociarová, A. Effect of technological parameters of machining on energy efficiency in face milling of heat-treated oak wood. *Research Gate* [online]. 2018-06 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/Publication/326030909_Effect_of_technological_parameters_of_machining_on_energy_efficiency_in_face_milling_of_heat-treated_oak_wood>. ISSN 6133-6146>

Kretschmann, D. E., Alden, H. A., and Verill, S. „*Variations of microfibril angle in loblolly pine: Comparison of iodine crystallization and X-ray diffraction techniques,*“ in *Microfibril Angle in Wood*, Butterfield, B. G. (ed.), University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1997. s. 157-176.

Kubš, Jiří. 2019. *Termicky modifikované dřevo (thermowood®) vliv nezávislých parametrů (technicko-technologických) na závislé parametry (energetické a kvalitativní) při rovinném frézování.* Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, 2019. 167 s.

Kupsa, P. *Termická úprava dřevin.* Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra zpracování dřeva a biomateriálů, Praha, 2019. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Gaff, PhD. 65 s.

Mayes, D. and Oksanen, O. *ThermoWood Handbook.* Finnforest, Finland 2002.

Melcer I., Melcerová A., Kačík F., Šindler J., Vargicová K, Sertič V. *Zmeny vlastností bukového dreva po jeho termickom zpracování.* *Drevo*, 1990. s. 255-260.

Militz, H. and Tjeerdsma, B. *Heat treatment of wood by the PLATO-process. Review on heat treatments of wood.* In: Rapp AO (ed) *Proc of the special seminar held in Antibes, France, on 9 February 2001, Forestry and Forestry Products, France.* COST Action E22, EUR 19885, s. 23–24

Mitchell, P. H. *Irreversible property changes of small loblolly pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen.* *Wood and Fiber Science*, 20(3), 1988. 320–355.

Moscovciuc, M. *Fyzikální – mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva Iroko (Milicia excelsa) a Padouk (Pterocarpus soyauxii).* Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra zpracování dřeva a biomateriálů, Praha, 2020. Vedoucí práce doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Nuopponen, M., Vuorinen, T., Jämsä, S. and Viitaniemi, P. *The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studies by FTIR spectroscopic methods.* *Wood Science and Technology*, 2003. 37(2), s. 109–115.

Pánek, M., Reinprecht, L., Mamoňová, M. *Trichoderma virideforimproving sprucewood impregnability.* *BioResources* 8(2), 2013. 1731-1746.

Požgaj, A., a kol. *Štruktúra a vlastnosti dreva.* Bratislava: Príroda, 1997. ISBN 80-07-00960-4. 485 s.

Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva.* Príroda Bratislava. 1993. 485 s.

PROKOM R&S s.r.o. *ThermoWood® - prkna, desky, hranoly, podklady a podpěry.* [cit. 2021-01-12]. Dostupné z WWW: <<https://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/121-tepelne-upravene-drevo-thermowood-hoblovana-prkna-hranoly-podpěry-a-konstrukcni-prvky>>

Reinprecht, L. a Vidholdová, Z. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie.* Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN: 978-80-228-1920-6.

Reinprecht, L. *Procesy degradácie dreva. 1. vydanie,* TU Zvolen, 1996. 150 s.

Reinprecht, L., Lehárová, J. *Mikroskopické analýzy bukového dřeva (Fagus sylvatica L.) v rôznych štádiách hniloby vplyvom húb Serpula lacrymans, Coriolus versicolor a Schizophyllum commune.* In: *Drevoznehodnocujúce huby 97, Sympóziu, TU Zvolen, 1997.* s. 91-101.

Reinprecht, L., Pánek, M. *Bio-treatment of spruce wood for improving of its permeability and soaking – Part 2: Direct treatment with the fungus Trichoderma viride.* Wood Research 53(3), 2008. s. 1-8.

Reinprecht, L., Pánek, M. *Trvanlivost a ochrana dřeva.* V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. ISBN 978-80-213-2660-6.

Rosenqvist, M. *The distribution of introduced acetyl groups and a linseed oil model substance in wood examined by microradiography and ESEM.* International Research Group on Wood Preservation, 2000. Doc. No. IRG/WP 00-40169.

Rowell R. M. *Penetration and reactivity of cell wall components.* In.: *The chemistry of Solid Wood*, Adv Chem Ser 207, Am Chem Soc, Washington, 1984. s. 175-209.

Sanderman, W. and Augustin, H. *Chemical investigations on the thermal decomposition of wood—Part III: chemical investigation on the course of decomposition.* Holz als Roh – und Werkstoff, 1964. 22(10), s. 377–386.

Sarni, F., Moutounet, M., Puech, J.-L. and Rabier, P. *Effect of heat treatment on oak wood extractable compounds.* Holzforschung, 1990. 44(6), s. 461–466.

SaunEco®. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z WWW: <<https://sauneco.com/shop/three-room-lodge-barrel-sauna-thermowood-t58e-electric-heater/>>

Sehlstedt-Persson, M. *Colour responses to heat treatment of extractives and sap from pine and spruce.* The 8th International IUFRO Wood Drying Conference, 2003. Brasov, Romania. s. 459-464.

Scheiding, W., Kruse, K., Plaschkies, K., Weiß, B. *Thermally modified wood (TW) for playground toys – investigations on 13 industrially manufactured products.* In: *Wood Modification: Processes, Properties and Commercialisation*, 2nd European Conference on Wood Modification, Göttingen – Germany, 2005. s. 12-19.

Solár, R., Lang, R. *Změny fyzikálních a chemických vlastností štíepok při úpravě ligninovornými houbami z pohľadu výroby buničín.* TU Zvolen, 2006. 56 s.

SONY. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z WWW: <<https://www.sony.cz/electronics/support/about-color-management>>

Stamm, A. J. *Wood and Cellulose Science.* Ronald Press, 1964, New York, USA.

Stamm, Alfred, J., Burr, Horace K. and Kline, Albert, A. *Staybwood— Heat-Stabilized Wood*. Ind. Eng. Chem. 1946. Vol. 38, 6, s. 630-634.

Syrjänen, T. and Kangas, E. *Heat treated timber in Finland*. International Research Group on Wood Preservation, 2000. Doc. No. IRG/WP 00-40158.

Syrjänen, T. and Kangas, E. *Heat treated timber in Finland*. International Research Group on Wood Preservation, 2000. Doc. No. IRG/WP 00-40158.

ThermoWood association: *Production statistics 2019*. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z WWW: <<https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/uutiset/Productionstatistics2019.pdf>>

ThermoWood handbook. 2003. *Word Wide Web*. [Online] 8. duben 2003. [cit. 2021-03-04]. Dostupné z WWW: <<https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat>>

Tiemann, H. D. *The effect of different methods of drying on the strength of wood*. Lumber World Review, 28(7), 1915. s. 19–20.

Tjeerdsma, B. F., Swager, P., Horstman, B., Hollevoom, B. W., Koman, W. J. *Process development of treatment of wood with modified hot oil*. In: Wood Modification: Processes, Properties and Commercialisation, 2nd European Conference on Wood Modification, Göttingen – Germany, 2005. s. 186–197.

Tjeerdsma, B., Boonstra, M., Pizzi, A., Tekely, P. and Militz, H. *Characterisation of thermally modified wood: Molecular reasons for wood performance improvement*. Holz Roh-Werkst 56, 1998. s. 149-153.

Trebula, P. *Sušenie a hydrotermická úprava dreva*. TU vo Zvolene, 1996. 255 s.

Viitaniemi, P. ja Jämsä, S. *Puun modifiointi lämpökäsittelyllä*. VTT julkaisu 814, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo, 1996.

Wang, J., Cooper, P. A. *Fire, flame resistance and thermal properties of oil thermally treated wood*. 2007. 10 s. IRG/WP/07-40361.

Welzbacher, C. R. and Rapp, A. O. *Durability of different heat treated materials from industrial processes in ground contact*. Stockholm: International Research Group on Wood Preservation, 2005.

Yinodotlgör, N. and Kartal, S. N. *Heat modification of wood: Chemical properties and resistance to mold and decay fungi*. Forest Products Journal 60(4), 2010. 357–361.