

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



Termická modifikace bukového dřeva impregnovaného pryskyřicí

Diplomová práce

Autor: Bc. Pavel Brejcha

Vedoucí práce: Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pavel Brejcha

Dřevařské inženýrství

Název práce

Termická modifikace bukového dřeva impregnovaného pryskyřicí

Název anglicky

Thermal modification of resin impregnated beech wood

Cíle práce

Cílem diplomové práce je určení vlivu termické modifikace bukového dřeva impregnovaného pryskyřicí na fyzikální a mechanické vlastnosti takto modifikovaného dřeva.

Metodika

Student formuluje teoretická východiska na základě studia odborné literatury a komparace výsledků jednotlivých autorů, kteří se věnují problematice termické úpravy impregnovaného dřeva. Na základě provedené literární rešerše dojde k výběru vhodného stupně termické úpravy, pryskyřice a parametrů impregnace. V praktické části bude hodnocen vliv zvolené modifikace na fyzikální a mechanické vlastnosti takto modifikovaného dřeva.

Harmonogram práce:

květen – říjen 2020: literární rešerše

září – říjen 2020: návrh metodiky

říjen 2020: příprava vzorků

říjen – listopad 2020: experimentální měření

prosinec 2020 – březen 2021: vyhodnocení výsledků a sepsání práce

duben 2021: odevzdání závěrečné práce

Doporučený rozsah práce

60 – 80 stran

Klíčová slova

mechanické vlastnosti; fyzikální vlastnosti; bukové dřevo; modifikace, impregnace

Doporučené zdroje informací

- BEHR, Georg, Susanne BOLLMUS, Antje GELLERICH a Holger MILITZ, 2017. Improvement of mechanical properties of thermally modified hardwood through melamine treatment. 13(5), 262-270. DOI: 10.1080/17480272.2017.1313313. ISSN 1748-0272.
- BODIG, J. – JAYNE, B A. *Mechanics of wood and wood composites*. Malabar: Krieger Publishing Company, 1993. ISBN 0-89464-777-6.
- HILL, C A S. *Wood modification : chemical, thermal and other processes*. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0-470-02172-1.
- LAHTELA, Ville a Timo KÄRKI, 2015. Effects of impregnation and heat treatment on the physical and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris*) wood. 11(4), 217-227. DOI: 10.1080/17480272.2014.971428. ISSN 1748-0272.
- LAHTELA, Ville a Timo KÄRKI, 2016. The influence of melamine impregnation and heat treatment on the fire performance of Scots pine (*Pinus sylvestris*) wood. *Fire and Materials*. 40(5), 731-737. DOI: 10.1002/fam.2338. ISSN 03080501.
- REINPRECHT, L. *Wood deterioration, protection, and maintenance*. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2016. ISBN 978-1-119-10653-1.
- SUN, Bailing, Xuehua WANG a Junliang LIU, 2013. Changes in dimensional stability and mechanical properties of *Eucalyptus pellita* by melamine–urea–formaldehyde resin impregnation and heat treatment. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71(5), 557-562. DOI: 10.1007/s00107-013-0700-9. ISSN 0018-3768.
- XIA, Changlei, Yingji WU, Ying QIU, et al., 2019. Processing high-performance woody materials by means of vacuum-assisted resin infusion technology. *Journal of Cleaner Production*. 241. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118340. ISSN 09596526.
-

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

doc. Ing. Miloš Pánek, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 8. 7. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 18. 10. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 20. 01. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “Termická modifikace bukového dřeva impregnovaného pryskyřicí“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. et Ing. Štěpána Hýska, Ph.D., a čerpal informace jen ze zdrojů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

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

V Malechově dne 18. 3. 2021

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. et Ing. Štěpánu Hýskovi, Ph.D. za jeho ochotu, trpělivost, čas a cenné rady, kterými mě provázel během tvorby diplomové práce. Dále bych také rád poděkoval Ing. Tomáši Holečkovi za pomoc během výzkumné části této práce a zpracování výsledných dat.

Souhrn

Tato práce obsahuje teoretickou a praktickou část. V teoretické části této práce je zpracována charakteristika dřeviny buk, její mikroskopická a makroskopická stavba, výskyt této dřeviny v ČR a využití jejího dřeva. Dále je zde zpracována problematika termické modifikace dřeva, přehled jejích variant, postupů a způsobů provádění. Další částí je charakteristika impregnování dřeva, její nejčastěji používané způsoby a její využití. V neposlední řadě je zde také zpracován přehled změn mechanických a fyzikálních vlastností dřeva po termické modifikaci a impregnování.

V praktické části této práce je podrobně popsán metodický postup výroby zkušebních vzorků, které byly vyrobeny z bukového dřeva. Dále je v této části popsán postup a průběh impregnování těchto vzorků, jejich následná termická modifikace a další činnosti s tím spojené. Mezi zkoumané vlastnosti během tohoto výzkumu byla zařazena pevnost v ohybu při statickém zatížení, měření dynamického modulu pružnosti, zkouška houževnatosti a bobtnání. Všechny uvedené zkoušky probíhaly v laboratorních podmínkách na zařízeních k tomu určených a dle norem, odpovídajících daným zkouškám. Všechny takto naměřené hodnoty zkušebních těles byly statisticky zpracovány a vzájemně mezi sebou porovnány. Následně pak byly pozorovány rozdíly mezi jednotlivými druhy modifikace těles a na jejich základě byla data vyhodnocena. Z těchto výsledků vyplynulo, že u vzorků, které byly impregnovány pryskyřicí ve třech koncentracích a následně termicky upraveny, nedošlo ke zlepšení rázové houževnatosti, statické pevnosti v ohybu ani ke zvýšení statického a dynamického modulu pružnosti ve srovnání se vzorky pouze termicky upravenými. Statická pevnost v ohybu byla u takto upravených vzorků o 60 MPa nižší než u referenčních vzorků. Ke zlepšení došlo u bobtnání, kdy vzorky, které byly modifikovány oběma metodami, vykazovaly nižší hodnoty objemového, tangenciálního a radiálního bobtnání v porovnání se vzorky dřeva pouze termicky upraveného. U objemového bobtnání vykazovaly vzorky upravené kombinací úprav o 12 % nižší hodnoty bobtnání než referenční vzorky.

Klíčová slova

mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti, bukové dřevo, modifikace, impregnace

Summary

This work contains a theoretical and practical part. In the theoretical part of this work, the characteristics of beech wood are processed its microscopic and macroscopic structure of wood, the occurrence of this tree in the Czech Republic and the use of its wood. Furthermore, the issue of thermal modification of wood, an overview of its variants, procedures and methods of implementation are elaborated here. Another part of the theoretical part is the characteristics of wood impregnation, its most commonly used methods and its use. Last but not least, there is also an overview of changes in the mechanical and physical properties of wood after thermal modification and impregnation.

The practical part of this work describes in detail the methodological procedure for the production of test specimens that were made of beech wood. Furthermore, this section describes the procedure and course of impregnation of these samples, their subsequent thermal modification and other activities associated with it. The properties investigated during this research included the flexural strength under static load, the measurement of the dynamic modulus of elasticity, the toughness test and the degree of swelling. All the above tests took place in laboratory conditions on equipment designed for this purpose and according to the standards corresponding to the given tests. All values of test specimens measured in this way were statistically processed and compared with each other. Subsequently, differences between individual types of body modifications were observed and based on them, the data were evaluated. These results showed that samples that were impregnated with resin in three concentrations and subsequently thermally treated did not improve the impact strength, static flexural strength or increase the static and dynamic modulus of elasticity compared to samples only thermally treated. The static flexural strength of the samples this treated was 60 MPa lower than that of the reference samples. There was an improvement in swelling, where samples that were modified by both methods showed lower values of volume, tangential and radial swelling compared to samples of only thermally treated wood. For volume swelling, the samples treated with the combination of adjustments showed 12% lower swelling values than the reference samples.

Keywords

mechanical properties, physical properties, Beech wood, modification, impregnation

Obsah

1. Úvod.....	12
2. Cíle práce	14
3. Rozbor problematiky	15
3.1. Buk lesní – <i>Fagus sylvatica</i> L.....	15
3.1.1. Dendrologická charakteristika	15
3.1.2. Makroskopická stavba	17
3.1.3. Mikroskopická stavba	18
3.1.4. Využití buku	19
3.2. Metody modifikace dřeva	20
3.3. Definice termicky upraveného dřeva	22
3.3.1. Proměnné procesu.....	22
3.3.2. Thermo-S	23
3.3.3. Thermo-D.....	23
3.4. Metody termické modifikace dřeva	23
3.4.1. Termická úprava dřeva v atmosféře vzduchu – ThermoWood.....	24
3.4.2. Termická úprava dřeva v prostředí vodní páry – PlatoWood.....	25
3.4.3. Termická úprava dřeva v prostředí interních plynů – RetificatedWood (retifikace).....	26
3.4.4. Termická úprava dřeva v prostředí olejů – OHT-Wood, RoyalWood, Menz Holz.....	27
3.5. Využití termicky upraveného dřeva	28
3.6. Problematika impregnování	29
3.6.1. Kapilární impregnace.....	30
3.6.2. Difúzní impregnace.....	30
3.6.3. Tlaková impregnace.....	31
3.7. Vliv termických úprav na vlastnosti dřeva.....	33

3.7.1.	Fyzikální vlastnosti termodřeva	33
3.7.2.	Mechanické vlastnosti termodřeva	39
3.8.	Vliv impregnace a následné termické modifikace na vlastnosti dřeva	44
3.8.1.	Tvrдость	44
3.8.2.	Mez pevnosti	45
3.8.3.	Protipožární odolnost	45
3.8.4.	Hustota a hmotnost	46
3.8.5.	Rozměrová stabilita	47
4.	Metodika	48
4.1.	Výběr a příprava vzorků pro výzkum	48
4.2.	Impregnace	49
4.3.	Kontrolní vážení a vytvrzení impregnační látky	52
4.4.	Termická úprava	52
4.5.	Klimatizování	54
4.6.	Měření a vážení zkušebních vzorků po modifikacích a klimatizování	55
4.7.	Měření mechanických a fyzikálních vlastností	56
4.7.1.	Měření dynamického modulu pružnosti	56
4.7.2.	Pevnost v ohybu	57
4.7.3.	Rázová houževnatost	59
4.7.4.	Zkouška bobtnání	60
4.8.	Vyhodnocení dat	62
5.	Výsledky a diskuze	63
5.1.	Hustota	63
5.2.	Rázová houževnatost	65
5.3.	Statická pevnost v ohybu	68
5.4.	Dynamický modul pružnosti	70
5.5.	Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti	72

5.6. Bobtnání	73
6. Závěr	75
7. Použité zdroje	78
7.1. Literatura	78
7.2. Webové zdroje a elektronické dokumenty	82
7.3. Normy	83

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Buk - makroskopická stavba (autor)	17
Obrázek 2 - Buk - mikroskopická stavba (NIS, 2013)	18
Obrázek 3 - Fáze procesu – ThermoWood (Mayes, 2003).....	24
Obrázek 4 - Sorpčně-desorpční hysterze rostlého dřeva (Hill, 2006).....	34
Obrázek 5 - Sorpčně-desorpční hysterze termicky modifikovaného dřeva (Hill, 2006).....	34
Obrázek 6 - Vliv termické úpravy na hustotu (Mayes, 2003)	36
Obrázek 7 - Barevné změny termicky modifikovaného dřeva (Prokom, 2020).....	37
Obrázek 8 – Vliv termické úpravy na pevnost v ohybu (Mayes, 2003).	40
Obrázek 9 - Exponenciální pokles rázové houževnatosti dřeva po termické modifikaci vzhledem k úbytkům hmotnosti (Reinprecht, 1992)	41
Obrázek 10 – Vliv teploty termické modifikace na modul pružnosti borovice (Mayes, 2003).	42
Obrázek 11 - Vliv termické úpravy dřeva na jeho biologickou odolnost (Mayes, 2003).	43
Obrázek 12 - Mez pevnosti impregnovaného a termicky upraveného dřeva (Behr, 2018)	45
Obrázek 13 - Zvýšení hmotnosti a hustoty dřeva impregnovaného fenolformaldehydovou pryskyřicí (Wang, 2019)	46
Obrázek 14 - Rozměrová stabilita dřeva impregnovaného fenolformaldehydovou pryskyřicí (Wang, 2019).....	47
Obrázek 15 - Příprava vzorků pro impregnování (autor)	50
Obrázek 16 - Technický list impregnační látky (autor).....	50
Obrázek 17 - Tlaková impregnační komora - autokláv (autor)	51

Obrázek 18 - Termovací komora (autor)	52
Obrázek 19 - Křivka změny teploty termické úpravy během výzkumu (autor)	54
Obrázek 20 - Laboratorní váha a posuvné měřítko (autor).....	55
Obrázek 21 - Měřicí přístroj FAKOPP Ultrasonic Timer (autor).....	56
Obrázek 22 - Zkušební zařízení TIRA 2850 S (autor).....	58
Obrázek 23 - Charpyho přerážecí kladivo (autor)	60
Obrázek 24 - Horkovzdušná sušárna Binder (autor)	61

Seznam tabulek

Tabulka. 1 - Zastoupení buku v ČR (Czechforest, 2018)	16
Tabulka 2 - Využití Thermo-S (Prokom, 2020)	28
Tabulka 3 - Využití Thermo-D (Prokom, 2020).....	28
Tabulka 4 - Tepelně-izolační vlastnosti termicky upraveného dřeva (Prologno, 2021). 38	
Tabulka. 5 - Značení vzorků (autor)	49
Tabulka 6 - Statistická významnost faktoru (autor).....	62
Tabulka 7 - Statistická data - hustota (autor)	63
Tabulka 8 – Změna hustoty (autor).....	64
Tabulka 9 - Statistická data - rázová houževnatost (autor).....	66
Tabulka 10 - Duncanův test - rázová houževnatost (autor)	67
Tabulka 11 - Závislost rázové houževnatosti na hustotě (autor)	67
Tabulka 12 - Statistická data - statická pevnost v ohybu (autor).....	69
Tabulka 13 - Závislost statické pevnosti v ohybu na hustotě (autor)	69
Tabulka 14 - Statistická data - dynamický modul pružnosti (autor).....	71
Tabulka 15 - Závislost dynamického modulu pružnosti na hustotě (autor)	71

Seznam grafů

Graf 1 - Hustota (autor)	64
Graf 2 - Rázová houževnatost (autor).....	66
Graf 3 - Statická pevnost v ohybu (autor).....	68
Graf 4 - Dynamický modul pružnosti (autor)	70
Graf 5 - Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti (autor).....	72
Graf 6 - Bobtnání (autor)	74

1. Úvod

Žijeme v době, kdy je kladen velmi velký důraz na problematiku zhoršujících se klimatických podmínek a možné vyčerpání neobnovitelných zdrojů surovin. Proto jsou upřednostňovány a do popředí protlačovány materiály obnovitelné a recyklovatelné. Jedním z těchto materiálů je dřevo. Je proto v posledních letech stále více využíváno a prosazováno například ve stavebnictví. Jako většina materiálů má i dřevo své silné, ale také slabé stránky.

Jedná se o obnovitelný, přírodní, hygroskopický, pórovitý a nehomogenní materiál. Dřevo je anizotropním materiálem a má tak rozdílné vlastnosti v jednotlivých směrech. Také vlivem působení okolní vlhkosti mění své rozměry a je náchylné na působení biotických a abiotických činitelů (houby, plísně, hmyz, povětrnostní vlivy apod.), což z něj dělá v mnoha ohledech nevyhovující materiál. I přes tyto nežádoucí vlastnosti je dřevo materiálem používaným již dlouhé roky a bylo součástí jedněch z prvních nástrojů. V současnosti se jeho používání značně rozšiřuje a je tak využíváno v celé řadě odvětví průmyslu i stavebnictví. S rostoucím uplatnění dřeva se rozvíjejí i jeho modifikace pro zlepšení jeho vlastností, ochrany proti biotickým a abiotickým činitelům a širší spektrum jeho využívání.

Jednou z těchto modifikací je termická úprava dřeva, vlivem které u takto upraveného dřeva dochází ke zlepšení některých vlastností, jako jsou například snížení hodnot bobtnání a sesychání. Také je zlepšena odolnost vůči biotickým a abiotickým činitelům, a proto je možné dřevo využívat i v horších povětrnostních podmínkách než dřevo neupravené. Termicky modifikované dřevo má i své nevýhody a to zejména sníženou pevnost. Nedá se proto používat jako nosný konstrukční materiál. Dalším způsobem modifikace je impregnování dřeva, kdy nejčastěji dochází k prosycení dřeva látkou, která má například za účel zvýšení odolnosti vůči biotickým a abiotickým vlivům nebo například snížení rizika hoření. Metody impregnování však nemají moc velkou účinnost. Z tohoto důvodu se nabízí možnost kombinace těchto dvou metod, proto se bude tato práce zabývat problematikou termické modifikace bukového dřeva impregnovaného pryskyřicí. Cílem bude zjistit, zda má impregnace dřeva a jeho následná termická modifikace vliv na mechanické vlastnosti dřeva. Ze získaných

výsledků bude možné zhodnotit, zda má takováto modifikace dřeva vliv na zlepšení jeho vlastností či nikoli.

V případě prokázání pozitivního vlivu na vlastnosti takto upraveného dřeva by mohlo dojít k většímu využívání buku v dřevařském průmyslu. V současné době je buk druhou nejčastěji se vyskytující dřevinou na našem území hned po smrku a má značné zastoupení v zásobě dřeva ČR. Vzhledem ke kůrovcové kalamitě je zásoba smrku značně omezena a je proto nutné najít alternativní dřevinu, která by zvládla smrk alespoň částečně zastoupit. Dřevinou, která by to alespoň částečně dokázala, je právě buk. Z tohoto důvodu by bylo dobré najít způsob modifikace, která by pomohla rozšířit uplatnění buku.

2. Cíle práce

Cílem diplomové práce je určení vlivu termické modifikace bukového dřeva impregnovaného pryskyřicí na fyzikální a mechanické vlastnosti takto modifikovaného dřeva.

Jedním z úkolů bylo prostudování dostupných materiálů týkajících se problematiky této práce a následné shrnutí těchto poznatků. K tomuto posloužily místní i zahraniční knižní a internetové zdroje informací. Literární část byla zaměřena na problematiku dřeviny buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), jeho dendrologický popis, makroskopickou stavbu, mikroskopickou stavbu a způsob použití této dřeviny. V teoretické části byla také rozvedena problematika termické modifikace dřeva, impregnace dřeva, rozbor mechanických a fyzikálních vlastností dřeva.

3. Rozbor problematiky

3.1. Buk lesní – *Fagus sylvatica* L.

Buk lesní řadíme do: druhu buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), rodu buk (*Fagus* L.), čeledi bukovité (*Fagaceae* Dumort), řádu bukotvarých (*Fagales* Engler), třídy vyšších dvouděložných rostlin (*Rosopsida* Batsch), oddělení rostlin krytosemenných (*Magnoliophyta* Cronquist, Takht. & W. Zimm.), říše rostlinné (*Plantae* Haeckel), nadříše (*Bikonta*) a soustavy živých organismů (*Vitae*) (Zicha, 1999).

3.1.1. Dendrologická charakteristika

Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) je listnatý opadavý strom, který dorůstá výšky až 40 m. Jako volně rostlý strom má krátký kmen a široce rozložitou korunu. V zapojených porostech je kmen vysoko nevětvený sloupovitý se štíhlou korunou (Aas, 2002). Kmen je rovný, válcovitý, ve výčetní výšce 1,3 m nad zemí dosahuje průměru až 1,5 m. Většinou je kmen vysoko do koruny průběžný a větve se oddělují v ostrém úhlu (Musil, 2005).

Pupeny jsou protáhle kuželovité, mírně dovnitř zahnuté, uprostřed nejsilnější asi 1 cm dlouhé, špičaté s četnými pupenovými šupinami, k větvičce přitisklé, kolmo postavené nad listovou jizvou. Puppenové šupiny jsou červenohnědé nebo světle hnědé, vejčité, na vrcholu a na okraji jemně bělavé. Květní pupeny jsou velké a s četnými pupenovými šupinami. Mladé větvičky jsou zprohýbané, zelené, chlupaté zejména v blízkosti pupenů (Červenka, 1980). Stromy buku začínají kvést počátkem května současně s rozvíráním listů. Samčí květy vyrůstají z úžlabí lisů v delších (3 - 4 mm) stopkatých převislých svazečcích. Kratší samičí (pestíkové) květy jsou po dvou v červenohnědé číšce zevně porostlé, z počátku chlupatými, posléze dřevnatými výrůstky (Úradníček 2001).

Listy jsou ve střídavém dvouřadém uspořádání. Řapík je dlouhý 10 – 15 mm, čepele listů jsou vejčité až eliptické špičaté, 5 – 10 cm dlouhé, s 5 až 9 páry postranních žilek, celokrajné nebo slabě vlnité až tupě zubaté, v mládí tenké hedvábně chlupaté (Aas, 2002).

Plody jsou asi 1 cm velké, hnědé lesklé trojboké, na hranách křídlaté nažky (bukvice). Tyto nažky jsou uzavřeny po 2 – 3 kusech v hnědé, dřevnaté, ostnitě číšce, stopkaté asi 2 cm velké a rozevírající se 4 chlopněmi (Botany, 2017).

Kůra je stříbřitě šedá, až do vysokého stáří hladká. Kůra na kmeni nikdy nepuká, nebo jen vzácně tvoří borku (Aas, 2002).

Buk se vyskytuje v západní, střední a jižní oblasti Evropy, a to zejména na severu Španělska, jihovýchodě Anglie, v Dánsku, na jihu Švédska, západě Polska, v podhořích Rumunska, Balkánského poloostrova, Itálie a Korsiky. V severních oblastech roste buk zejména na rovinných plochách. V jižních oblastech se vyskytuje buk spíše v pohořích. V Evropě zaujímá buk 10 % lesní plochy. Tato hodnota odpovídá přibližně 17 mil. hektarům bukových lesů. V zemích jako je Německo, Francie a Švýcarsko, zaujímá buk 10 – 20 % celkové zalesněné plochy. Na Balkánském poloostrově tato hodnota dosahuje až 40 % (Wagenführ, 2002). Vertikální rozmezí výskytu buku je 17 – 2000 m n. m. V České republice se buk vyskytuje téměř po celém území (Botany, 2017). Z tabulky č. 1 je zřejmé, že buk je v České republice po smrku druhou nejvíce se vyskytující dřevinou.

Tabulka. 1 - Zastoupení buku v ČR (Czechforest, 2018)

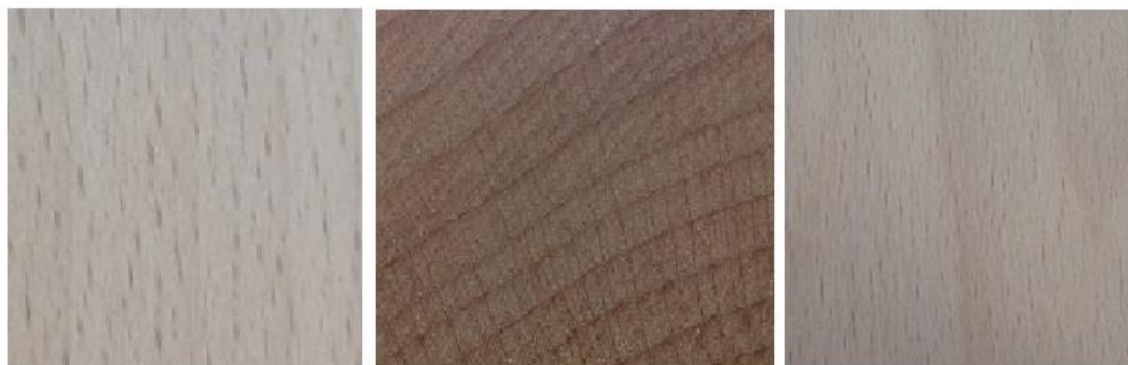
Skupina dřevin	Zastoupení [%]	Skupina dřevin	Zastoupení [%]
Jehličnany	57,8	Listnáče	42,2
Smrk ztepilý	43,1	Buk lesní	10,5
Jedle bělokorá	0,9	Duby	8,2
Borovice lesní	9,6	Habr obecný	2,4
Modřín evropský	3,2	Javory	4,1
Ostatní jehličnaté	0,9	Jasany	1,6
		Olše	2,4
		Břízy	4,2
		Ostatní list. tvrdé	3,9
		Ostatní list. měkké	4,9

Jedná se o dřevinu oceánického a suboceánického klimatu s ročními srážkami 800 - 1000 mm. Buk je na našem území třetí nejtolerantnější dřevinou vůči zástínu u nás (po tisu a jedli). Vytváří víceetážové prostory, kdy vlivem svého clonění vytlačuje většinu ostatních dřevin. Buk nejlépe roste na čerstvě vlhkých, dobře provzdušněných a minerálně bohatých, často vápnatých půdách. Buku se naopak nedaří v půdách zamokřených, ulehlých a také špatně snáší suché písčité půdy. Buk je náchylný na sucho a pozdní mrazy (Botany, 2017).

Dřevo buku je světlé, bělavé, nahnědlé či narůžovělé, a pokud je vystaveno působení páry, tak tmavne. Má jemnou stejnorodou texturu, rovné žilky, drobné paprsky. Jedná se o dřevo, které rychle vysychá a má sklon k praskání. V dlouhodobém styku s vodou a vlhkem dochází k tmavnutí a následné hnilobě dřeva (Praktická kniha o dřevě, 2009). Dřevo buku má vysokou tvrdost. Textura je stálá a uzavřená, po broušení velmi hladká. Vlákna jsou rovná a bez vad. Pařený buk je tmavší a načervenalější (Gibbs, 2005).

3.1.2. Makroskopická stavba

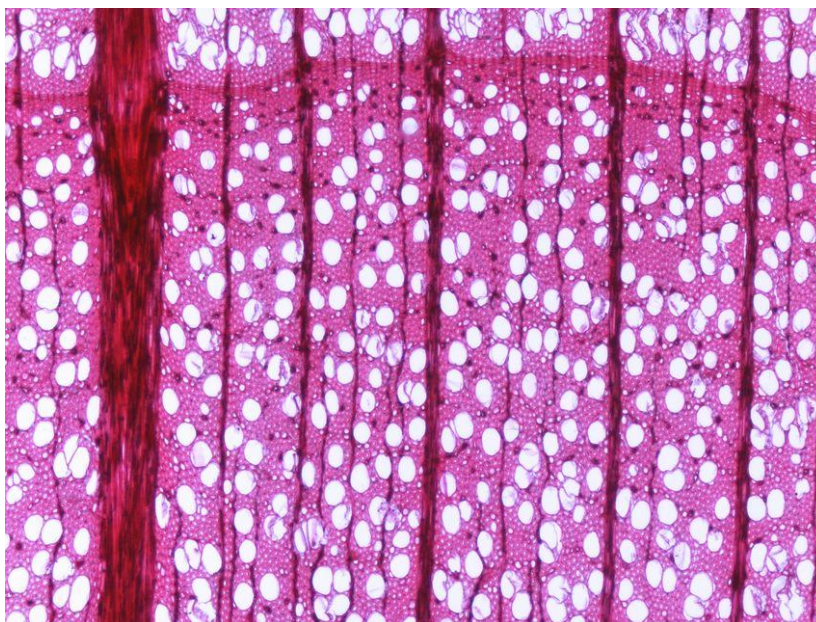
Dřevo buku řadíme do skupiny roztroušeně pórovitých listnatých dřevin. Cévy jsou nevýrazné a pouhým okem nejsou zřetelné. Letokruhy buku jsou viditelné a rozpoznatelné pouhým okem. Charakteristickým znakem buku jsou dřeňové paprsky, které je možné pozorovat na všech řezech. Na příčném řezu se projevují jako různě široké, paprscitě se rozbíhající přímky, na radiálním řezu se jeví jako tzv. zrcátka na tangenciálním řezu vytváří krátké, tmavší, různě vysoké linky vřetenovitého tvaru (Zeidler, 2016).



Obrázek 1 - Buk - makroskopická stavba (autor)

3.1.3. Mikroskopická stavba

Na obrázku č. 2 můžeme vidět příčný řez bukového dřeva, který je pomocí mikroskopu 40x přiblížený. V horní části je možné vidět zřetelnou hranici letokruhu. Ze snímku příčného řezu je také vidět velké množství cév. Některé cévy jsou uspořádány jednotlivě a některé tvoří skupinky po 2 – 6 cévách. U cévních článků trachejí jsou rozlišovány dva druhy perforací. Určujícím faktorem je místo, kde se daná céva nachází. V jarní části letokruhu se vyskytují širší tracheje, které mají perforaci jednoduchou. V letní části letokruhu se vyskytují tracheje užší, které obsahují žebříčkovou perforaci. Při ještě větším přiblížení je možné na příčném řezu u dřeva buku vidět přítomnost libriformních vláken a vláknitých tracheid, které se podílí na složení základního pletiva dřeva. V levé části obrázku je vidět výrazný dřevový paprsek, který je na hranici letokruhu nepatrně rozšířený. Tyto dřevové paprsky tvoří na radiálním řezu tzv. křížová pole. Dřevové paprsky rozlišujeme na jednovrstvé a mnohovrstvé. Jednovrstvé dřevové paprsky pozorovatelné na tangenciálním řezu tvoří nad sebou umístěné parenchymatické buňky (15 – 100 buněk). U mnohovrstvých dřevových paprsků je to na tangenciálním řezu v horizontálním směru zhruba 10 – 20 buněk a ve vertikálním směru 50 – 100 buněk (na tangenciálním řezu utváří vřetenovité útvary). Podélný dřevní parenchym se vyskytuje jak v základním pletivu, tak v okolí cév a tracheid (Balabán, 1955; Butterfield, 1980; Gandelová 2014).



Obrázek 2 - Buk - mikroskopická stavba (NIS, 2013)

3.1.4. Využití buku

Vzhledem k velkému zastoupení buku v naší zemi a dostupnosti se nabízí otázka jeho zpracování. Buk nachází v ČR široké uplatnění a je nejvíce hospodářsky upotřebitelnou listnatou dřevinou. Jedním z nejznámějších využití buku je výroba ohýbaného nábytku. Díky svým vlastnostem je buk primární surovinou pro tyto účely. Další podstatné využití nachází dřevo buku při výrobě dých a následné výrobě překližovaných desek. Velké uplatnění má buk i v truhlářské výrobě, kde je jednou z nejčastěji používaných dřevin pro výrobu nábytku, interiérových schodišť, podlahových parket a mnoha dalších výrobků. Své zastoupení má i ve výrobě hudebních nástrojů. Dřevo buku je také zdrojem suroviny pro výrobu buničiny nebo třeba dřevité vlny. Vzhledem ke špatné odolnosti bukového dřeva vůči působení atmosférických vlivů v exteriéru je bukové dřevo využíváno většinou v interiérech nebo tam, kde není vystaveno těmto vlivům. Z těchto důvodů je snaha bukové dřevo modifikovat tak, aby získalo vůči těmto vlivům větší odolnost a našlo tak zastoupení i v místech vystavených například povětrnosti (Němec, 2005).

3.2. Metody modifikace dřeva

Modifikace dřeva je možné dosáhnout několika základními technologickými procesy. Tyto procesy jsou rozdělené do základních skupin, a to dle druhu dosažené přeměny materiálu. Je možné rozlišit fyzikální, mechanické, chemické, biochemické a přírodní přeměny (Reinprecht, 2008).

Mechanické metody jsou založené na prvotní plastifikaci dřeva a na jeho následném slisování. Lignin ve dřevě je možné plastifikovat hydrotermickou úpravou, čpavkováním či jinými způsoby. Takto plastifikované dřevo je následně lisováno v kovových formách, čímž dojde k získání výrobku typu Staypak/Staywood, Lignostone, Lignamon a jiným. Tyto zmíněné typy dokáží odolávat termickým degradacím lépe než neupravené a jsou odolnější i z požárního hlediska. Jejich odolnost vůči hnilobě a jiným biologickým škůdcům není nějak významně změněna (Rowell, 1978; Reinprecht a kol., 2005).

Chemické metody jsou založeny na ošetření dřeva chemickými látkami bez přímého biocidního nebo jiného ochranného účinku. Tyto modifikační chemické látky zůstávají buď jen v lumenech buněk anebo pronikají i do buněčných stěn. Mohou tak ve dřevě vstupovat i do chemických reakcí s ligninem, celulózu a hemicelulózu. V aktivně modifikovaném dřevě, ve kterém vznikly chemické reakce mezi dřevěnou substancí a chemickou látkou, nabývají vyšší odolnost vůči vodě, UV záření a biologickým škůdcům (Rowell, 1984; Hill, 2006; Reinprecht 2008).

Termické metody jsou založeny na termických a hydrotermických úpravách dřev při vysokých teplotách. Tyto teploty se pohybují v oblasti 150 – 220 – 260 °C. Vlivem těchto vysokých teplot dochází k rozkladu v některých stavebních polymerech dřeva, a to zejména hemicelulózy a tvoří se nové ve vodě nerozpustné látky. Vznikají zároveň i látky s toxickým nebo odpuzujícím účinkem proti biologickým škůdcům. Touto úpravou však dochází ke snížení pevnosti dřeva. Toto se dá částečně omezit, pokud se termická úprava provádí v interním prostředí bez přístupu kyslíku (ve vakuu v dusíku nebo v olejích) (Hill, 2006).

Enzymatické metody spočívají ve snížení podílu - OH fenolických skupin v ligninu, jako i - OH skupin obsažených v celulóze a hemicelulóze. Toto probíhá pomocí oxidačně redukčních enzymů (Hill, 2006).

Úlohou všech modifikačních procesů je změna struktury dřeva, a to tak, aby došlo ke zlepšení jeho vybraných vlastností. Při mechanických modifikacích dřeva se mění jeho geometrická struktura, případně i jeho morfolgická a anatomická struktura. Tímto dochází většinou i ke zvyšování hustoty a tvrdosti. Při chemických, termických a enzymatických modifikacích se ve dřevě primárně mění jeho molekulárně-chemická struktura. Možné jsou i změny v jeho anatomické, geometrické a morfolgické struktuře. Takto modifikované dřevo nabývá větší trvanlivosti a je hydrofobnější. Molekuly nebo povrchy jsou neinteragující s vodou. Jde o takové molekuly, které nenesou žádný náboj (převaha nepolárních vazeb v molekule) a tvoří tak s vodou jen málo nebo žádné vodíkové můstky a ve vodě se tedy nerozpouštějí. (Hill, 2006).

3.3. Definice termicky upraveného dřeva

U termické modifikace dřeva dochází především k chemické přeměně materiálu. Chemická struktura se mění za působení zvýšené teploty pohybující se v rozmezí 160 - 240 °C. Díky tomu dosahuje materiál lepší odolnosti vůči biotickým a abiotickým vlivům, což je jedním z hlavních důvodů této modifikace. Tímto zároveň roste spektrum jeho uplatnění a použití (Reinprecht, 2008). Při vysokých teplotách během procesu termické úpravy dochází ve dřevě k rozkladu sacharidů. Riziko napadení dřeva houbami a hmyzem se tak snižuje. V případě takto termicky upraveného dřeva není zapotřebí použití jakýchkoliv chemických prostředků na ochranu proti škůdcům (Prokom, 2020).

Termicky upravené dřevo nachází uplatnění nejčastěji ve Finsku, ale i v západní Evropě. Za prvopočátky takto upraveného dřeva je považováno období 90. let minulého století. První pokusy o termické upravení dřeva jsou známé již od 30. let 20. století v Německu (ITWA, 2017).

Vysoká úroveň odolnosti a rozměrová stabilita termicky modifikovaného dřeva zaručuje to, že v materiálu probíhají jen minimální rozměrové změny. Termodřevo má redukovanou tepelnou vodivost, a proto se při vzrůstu teploty méně zahřívá (Kačíková, Kačík, 2011).

3.3.1. Proměnné procesu

Existuje celá řada metod tepelné modifikace, které lze použít na dřevo, a přesná metoda modifikace může mít významný vliv na vlastnosti tepelně upraveného dřeva. Mezi důležité procesní proměnné patří následující:

- čas a teplota ošetření,
- atmosféra zpracování,
- uzavřené versus otevřené systémy,
- dřeviny,
- mokré a suché systémy,
- rozměry vzorku,
- použití katalyzátorů,

(Hill, 2006).

Termodřevo je v současnosti vyráběno ve dvou variantách: pro použití v exteriéru (Thermo-D) nebo pro použití v interiéru (Thermo-S). U prvního typu je požadována vysoká odolnost a stabilita z důvodů vystavení výrobků exteriérovým podmínkám.

U metody Thermo-S je důležitý vzhled a stabilita materiálu. Vysoká úroveň odolnosti a rozměrová stabilita zaručuje to, že v tomto materiálu dochází jen k minimálním rozměrovým změnám (Kačíková, Kačík, 2011).

3.3.2. Thermo-S

Písmeno „S“ v označení „Thermo-S“ znamená „stabilitu“, která je vedle vzhledu klíčovou vlastností při konečném použití produktů zpracovaných touto třídou úpravy. Pro dřevo ošetřené metodou Thermo-S je průměrné tangenciální bobtnání a sesychání způsobené vlhkostí stanoveno na 6 - 8 %. Thermo-S třída ThermoWood je podle normy EN 113 klasifikována jako relativně trvanlivá a jeho přirozená odolnost vůči rozkladu splňuje požadavky třídy 3 (ITWA, 2017).

3.3.3. Thermo-D

Písmeno „D“ v označení „Thermo-D“ značí „trvanlivost“. Biologická trvanlivost je klíčovou vlastností při konečné aplikaci produktů v této třídě zpracování. Průměrné tangenciální bobtnání a sesychání způsobené vlhkostí pro dřevo ošetřené třídou Thermo-D je stanoveno na 5 - 6 %. Thermo-D ThermoWood je dle normy EN 113 klasifikováno jako trvanlivé. Vyznačuje se přirozenou odolností vůči rozkladu a splňuje požadavky třídy 2 (ITWA, 2017).

3.4. Metody termické modifikace dřeva

Nejrozšířenějšími metodami termické modifikace dřeva jsou:

- úprava v atmosféře vzduchu – ThermoWood,
- úprava v prostředí vodní páry – PlatoWood,
- úprava v prostředí interních plynů – RetificatedWood,
- úprava v prostředí olejů – OHT-Wood, RoyalWood, Menz Holz.

Všechny tyto procesy jsou patentově chráněny a stále probíhá výzkum nových technologií.

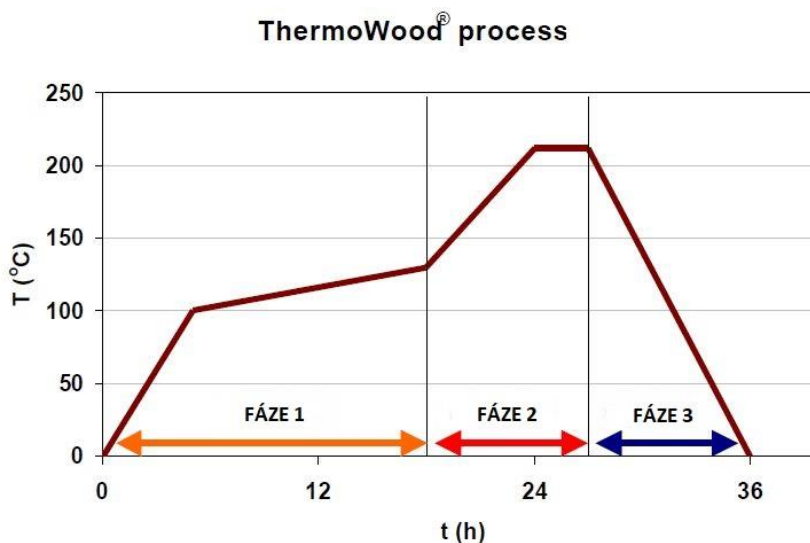
3.4.1. Termická úprava dřeva v atmosféře vzduchu – ThermoWood

Materiál s obchodním označením ThermoWood je vyráběn termickou úpravou jehličnatých a listnatých dřevin. Výroba je prováděna dle licenčního ThermoWood procesu – Stora, Finncore, VTT. Samotný proces termické úpravy je rozdělen do tří základních fází. Celý proces trvá přibližně 36 hodin.

První fází je zvýšení teploty a sušení, které probíhá v sušárně, kde je teplota rychle zvyšována na hodnotu 100 °C. Během tohoto ohřevu je do prostoru komory pouštěna vodní pára. Teplota v komoře je dále zvyšována na hodnotu 130 °C, ale rychlost nárůstu teploty je již nižší. Během této fáze je dřevo vysoušeno na téměř nulovou vlhkost a neobsahuje skoro žádnou vodu volnou ani vázanou. Jako sušící médium je využíván horký vzduch, který proudí uvnitř komory a působí na uložený materiál.

Hlavním účelem druhé fáze procesu je tepelná úprava. Teplota uvnitř komory je zvýšena na maximální hodnotu danou požadavky na klasifikační třídu ThermoWood. Při úpravě na třídu Thermo-D je dosažena maximální teplota 212 °C u jehličnatých dřevin a 200 °C u listnatých dřevin. U třídy Thermo-S jsou tyto teploty nižší, a to 190 °C u jehličnatých dřevin a 185 °C u listnatých dřevin. Tyto teploty působí na materiál uvnitř komory 2 – 3 hodiny.

Poslední fází procesu je chlazení a úprava vlhkosti materiálu. Teplota vzduchu v komoře je snižována a dochází tak k úpravě konečné vlhkosti na úroveň 4 – 7 % (Prokom, 2020; Reinprecht a Vidholdová, 2008; FTWA, 2017).



Obrázek 3 - Fáze procesu – ThermoWood (Mayes, 2003)

3.4.2. Termická úprava dřeva v prostředí vodní páry – PlatoWood

Proces termické úpravy PlatoWood je specifický tím, že úprava probíhá při nižších teplotách v prostředí vodní páry za zvýšeného tlaku. Označení procesu Plato je zkratkou pro Providing Lasting Advanced Timber Option. Tato metoda má původ v Holandsku. Proces termické modifikace touto metodou je rozdělen do čtyř fází.

První fází úpravy je hydrotermolýza. Jedná se o hydrotermickou úpravu vzduchosuchého dřeva, které probíhá v tlakové nádobě při zvýšeném tlaku 0,6 – 1 MPa při teplotě 150 – 190 °C po dobu 4 – 5 hodin. Pokud se modifikuje čerstvé dřevo, tak je používán horký vzduch. Je-li modifikováno dřevo, které je vzduchosuché, tak je použita vodní pára. Během této fáze dochází ke změnám v chemické stavbě materiálu. Zejména k částečnému odbourávání hemicelulóz a k aktivaci ligninu, zatímco celulóza zůstává bez změny.

Druhou fází úpravy je sušení, během kterého dochází k vysoušení dřeva v sušárně na vlhkost 8 – 10 % přibližně 3 – 5 dní.

Následnou fází je vytvrzování. Hlavním cílem této fáze je aktivování makromolekul ligninu, ke kterému dochází pomocí vzájemného síťování za pomoci rozložených produktů hemicelulóz. K vytvrzování dochází za omezeného přístupu vzduchu při atmosférickém tlaku 0,1 MPa, teplotě 150 – 190 °C po dobu přibližně 12 – 16 hodin. Hodnota vlhkosti dřeva při této fázi klesá pod 1 %.

V poslední čtvrté fázi je nutné, aby došlo ke zvlhčení upravovaného dřeva na konečnou vlhkost 4 – 6 %. K tomu dochází v sušárně a tato fáze trvá přibližně 3 dny (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Proces Plato je odvozen z technologie, která byla původně vyvinuta společností Royal Dutch Shell a byla vedlejším produktem z výzkumu hydrotermální přeměny biomasy na kapalná paliva. Hlavním konečným použitím dřeva Plato Wood je zahradní nábytek, oplocení, obklady, okenní rámy a dveře. V současné době je vyvíjena metoda pro využití platonizované dřevní štěpky, která by se používala při výrobě dřevotřískových desek (Hill, 2006). Dřevo upravené metodou Plato má o 50 % lepší rozměrovou stabilitu, hygroskopicitu materiálu je snížena o 30 – 40 % a ohybová pevnost je nižší o 5 - 20 %. Modifikací je zvýšena trvanlivost a odolnost vůči škůdcům (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

3.4.3. Termická úprava dřeva v prostředí interních plynů – RetificatWood (retifikace)

Princip termické úpravy retifikačním způsobem je založen na postupu, při kterém je v interním prostředí dusíku s podílem kyslíku menším než 2 % upravované dřevo zahříváno při vysokých teplotách, a to 210 – 260 °C. Během působení těchto podmínek dochází k mírné pyrolýze dřeva. Před samotným procesem je nutné, aby bylo dřevo předsušeno na vlhkost 12 %. Během modifikace ve dřevě probíhají termooxidační reakce jen v malé míře a jeho původní pevnost proto není nijak zvláště ovlivněna (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Ve Francii existují dva různé procesy tepelného zpracování dřeva zvané Retifikace a Bois Perdure. Proces retifikace byl industrializován roku 1997 a retifikované dřevo je prodáváno s ochrannou známkou Retiwood. Proces Bois Perdure používá zelené dřevo, které je ošetřeno rychlým sušením pomocí par horkých spalovacích plynů produkovanými zvýšením teploty na 200 - 240 ° C (BioResources, 2021).

Retifikace je proces vyvinutý ve Francii v École des Mines de St. Etienne. Tato úprava zahrnuje ohřev dřeva (dříve vysušeného na 12 %) v dusíkové atmosféře. Úprava dřeva probíhá v prostředí obsahujícím méně než 2 % kyslíku, při teplotách mezi 180 °C a 250 °C. Industrializaci tohoto procesu provedla společnost s názvem New Option Wood (NOW) SA (také známá jako Retitech). Tato industrializace byla zahájena v roce 1995 prvním prototypem pece o objemu 2 m³, která je schopna takto upravovat prkna o délce až 3 m. Proces Perdure zahrnuje sušení a následné ohřívání dřeva při teplotách v rozmezí od 200 °C do 230 °C v parní atmosféře (Hill, 2006).

3.4.4. Termická úprava dřeva v prostředí olejů – OHT-Wood, RoyalWood, Menz Holz

Modifikace označená OHT (Oil Heat Treatment) je specifická tím, že probíhá v prostředí rostlinných olejů. Při této metodě je spotřeba oleje na 1 m³ dřeva zhruba 20 – 60 kg. Úprava touto metodou probíhá v impregnačním kotli, kde je jako médium použit horký rostlinný olej o teplotě 200 – 220 °C. Nežádoucí termooxidační procesy ve dřevě při úpravě jsou omezeny, díky tomu, že se v něm nachází během modifikace malé množství kyslíku. Metoda je založena na pomalém vnikání rostlinného oleje do dřeva a jeho postupném ohřevu. Během úpravy je nutné dosáhnout a udržovat ve středu dřeva teplotu 180 – 200 °C po dobu 2 – 4 hodin. K tomuto procesu je nejčastěji používán lněný olej, který umožňuje rychlý a rovnoměrný přenos tepla k buňkám upravovaného dřeva a zároveň je tím omezeno množství kyslíku, které buňky obsahují. Při výběru oleje, ve kterém je dřevo následně upravováno, je důležitá otázka jejich možné dodatečné polymerizace například pomocí triglycerolidových nenasycených mastných kyselin. Díky této polymerizaci po termické úpravě se může dosáhnout vlivem kyslíku optimalizace jejich stability. Triglyceridy mají schopnost částečně pronikat do buněčných stěn dřeva (Rosenqvist, 2000). Dále byly odzkoušeny při používání této metody úpravy i modifikované rostlinné oleje, které měly vliv na zlepšení bioodolnosti upravovaného dřeva. V tomto případě už se jedná o kombinaci termické a chemické modifikace dřeva (Tjeerdsma a kol., 20002).

Dalším metodou úpravy dřeva, která využívá k modifikaci prostředí olejů, je metoda zvaná Royal proces. Tato metoda je však od předchozího způsobu rozdílná v tom, že probíhá za sníženého tlaku a při teplotách 60 – 90 °C. Použitý olej při této metodě neproniká do buněčných stěn dřeva, ale je po ukončení procesu z impregnačního kotle vakuově odsáván. Tento způsob nemá aktuálně velké uplatnění, a to zejména z důvodu využívání dokonalejších technologií termické úpravy dřeva (Reinprecht a Vidholdová, 2008). Proces Royal byl původně vyvinut jako metoda sušení dřeva, ve kterém je dřevo zahříváno ve vakuu v prostředí olejů (Hill, 2006).

Menz Holz je další metoda, při které je jako ohřívací médium použit horký olej. Nejčastěji je používán olej řepkový, slunečnicový nebo lněný. Olej je použit jako médium k přenosu tepla na upravované dřevo a také vylučuje kyslík během procesu. Během této metody je teplota oleje 180 – 220 °C a doba působení na materiál je 18 hodin (Hill, 2006).

3.5. Využití termicky upraveného dřeva

Doporučené aplikace pro konečné použití u tepelně ošetřeného dřeva třídy Thermo-S:

Tabulka 2 - Využití Thermo-S (Prokom, 2020)

Thermo-S Softwood	Thermo-S Hardwood
<ul style="list-style-type: none">• stavební prvky (nenosné)• nábytek• zahradní nábytek• sauna a vybavení koupelen• komponenty dveří a oken	<ul style="list-style-type: none">• bytové vybavení• nábytek• podlahy• sauna a vybavení koupelen• zahradní nábytek

Doporučené aplikace pro konečné použití u tepelně ošetřeného dřeva třídy Thermo-D:

Tabulka 3 - Využití Thermo-D (Prokom, 2020)

Thermo-D Softwood	Thermo-D Hardwood
<ul style="list-style-type: none">• obklady• sauna a vybavení koupelen• podlahy• zahradní nábytek	<ul style="list-style-type: none">• venkovní obložení budov• exteriérové dveře• sauna a vybavení koupelen• podlahy• zahradní nábytek

Na základě výsledků praktických zkoušek (EN 252) se doporučuje nepoužívat Thermowood v základových podzemních aplikacích, kde je nutná konstrukční pevnost. Thermowood se nedoporučuje používat v trvalém přímém styku s vlhkou půdou. Pokud je neustále ponořen do vody nebo je uložen v půdě, ztrácí své pevnostní vlastnosti v důsledku určitých chemických reakcí (Prokom, 2020).

3.6. Problematika impregnování

Impregnace dřeva je považována za chemickou ochranu dřeva. Impregnování je využíváno v případech, kdy je kladen požadavek na zvýšení přirozené trvanlivosti dřeva vůči biologickým a abiotickým dřevoznehodnocujícím činitelům v různých typech expozic. Je používáno také pro dlouhodobou ochranu výrobků ze dřeva používaných v náročných expozicích, jako jsou například podvaly, sloupy, zahradní nábytek, exteriérové dřevěné konstrukce (sruby, mostní konstrukce, pergoly, terasy, palisády a podobné). Ochranné prostředky na dřevo jsou rozděleny do několika kategorií:

biocidy – látky, které jsou účinné vůči biologickým škůdcům,

- *fungicidy* – určené k ochraně dřeva vůči houbovým organizmům (dřevokazné, dřevozbarvující a mikroskopické plísně),
- *insekticidy* – určené k ochraně dřeva vůči dřevokaznému hmyzu,
- *baktericidy* – určené k ochraně dřeva vůči bakteriím,

retardéry hoření (antipyreny) – látky, které snižují hořlavost dřeva a zároveň potlačují jeho termický rozklad,

inhibitory povětrnostní koroze – látky, které jsou účinné vůči vlivu abiotických činitelů na povětrnosti,

inhibitory chemické koroze – látky, které jsou účinné vůči vlivu agresivních chemikálií.

U všech těchto ochranných prostředků je požadováno, aby byly účinné, aplikovatelné, stabilní, zdravotně nezávadné, eko-toxicky neškodné.

Princip impregnace je ovlivňován několika faktory, které mají vliv na aplikaci ochranných prostředků do dřeva. Jsou to hlavně:

- typ a intenzita hybných sil transportu (tlakové, difúzní),
- struktura dřeva,
- vlhkostní stav dřeva,
- fyzikálně-chemické vlastnosti ochranného prostředku (viskozita, povrchové napětí roztoků, polarita složek, velikost částic, difúzní koeficienty) (Reinprecht a Pánek, 2016).

Metody ošetření dřeva se volí podle účelu impregnovaného materiálu, jeho provozních podmínek a typu ochranné směsi. Na základě fyzikální povahy penetrace impregnační látky existují tři základní způsoby impregnace dřeva:

- kapilární,
- difúzní,
- impregnace pod tlakem.

3.6.1. Kapilární impregnace

Kapilární impregnace dřeva je založena na penetraci kapaliny do suché nebo sušené dřevěné hmoty vlivem kapilárních sil. Metody kapilární impregnace jsou málo účinné, protože poskytují pouze povrchovou impregnaci. Kapilární metody zahrnují:

Impregnace **nanesením ochranné látky** na povrch dřeva pomocí štětce, válečku nebo nástřiku. Hloubka impregnace tímto způsobem je provedena u čerstvého a zdravého dřeva 1–2 mm pod povrch a u starého porušeného dřeva je to 5 mm pod povrch dřeva.

Ponoření do impregnační kapaliny (doba ponoření je nastavena na sekundy nebo minuty). K pronikání kapaliny do dřeva dochází působením kapilárních sil a malého hydrostatického tlaku. Hloubka závisí na viskozitě kapaliny, propustnosti dřeva a době stárnutí. U této metody dochází k aplikaci impregnační látky hlouběji pod povrch dřeva než v předchozí metodě (Unistroy, 2017).

3.6.2. Difúzní impregnace

Difúzní impregnace je založena na pronikání látek do dřeva působením rozdílu v jejich koncentracích na povrchu a uvnitř dřeva. Jedná se o impregnaci namočením do tekutiny, která se od kapilární impregnace liší počáteční vlhkostí dřeva a dobou působení v lázni. V lázni s koncentrovanou antiseptickou tekutinou se nesuší, ale stahuje se surový sortiment, penetrace, ve které dochází k difúzi ochranných látek. Doba expozice se stanoví v závislosti na požadované úrovni ochrany v souladu s provozními podmínkami a pohybuje se od 2 - 3 hodin do několika týdnů. Při dlouhodobé expozici je prokázána penetrace molekul impregnační látky do větší hloubky. Proces difúzní impregnace je dlouhý a vyžaduje hodně manuální práce. Kromě toho je možné použít pouze anorganické ve vodě rozpustné impregnační látky (Unistroy, 2017).

3.6.3. Tlaková impregnace

Tlaková impregnace funguje na principu vnikání impregnační kapaliny do dřeva pod tlakem, který je vyšší než atmosférický tlak.

Impregnace ve vaně s přehřátím se provádí ve více technologických postupech. Nejběžnějším postupem je **použití dvou (horkých a studených) koupelí**. Dřevo určené k impregnování je zahříváno v lázni s horkou impregnační kapalinou a poté je přesunuto do lázně s chladnou impregnační kapalinou, díky čemuž dojde k samotné impregnaci.

Možnost použití jedné (**kombinované**) vany se používá jen zřídka. U tohoto postupu dojde k zahřátí dřeva v lázni horkou impregnační kapalinou a ta je následně rychle pomocí čerpadel nahrazena chladnou impregnační látkou. Kvalita impregnace je o něco vyšší než v prvním provedení. Je to zapříčiněno nedostatečným kontaktem ohřátého dřeva se vzduchem během přetížení, při kterém se v otevřených buňkách vytvoří vzduchové kapsy, které zpomalují pohyb tekutin ve dřevě.

Metoda horké a studené lázně je účinnější než kapilární metoda a byla proto v minulosti velmi rozšířena. Tato metoda však kvůli malému přetlaku neposkytuje dostatečnou hloubku impregnování.

Další možnou variantou je **kombinace sušicí komory a máčení** v lázni impregnačního roztoku. Materiál určený pro impregnaci se po vysušení na požadovanou hodnotu vlhkosti pro impregnování (25 - 30 %) vloží do lázně se studeným impregnačním roztokem. Po uplynutí času potřebného pro máčení v lázni je materiál opět přemístěn do sušárny a je vysušen na konečnou požadovanou vlhkost.

Autoklávové impregnační metody zajišťují velkou hloubku průniku impregnační látky do dřeva při krátké době procesu a relativně nízkých nákladech na práci a energii. Metoda VAD - autoklávová impregnace dřeva za atmosférického tlaku s aplikací počátečního a konečného vakua. Metoda VDV - autoklávová impregnace pod tlakem vyšším než atmosférickým s použitím počátečního a konečného vakua. Dřevo musí být bezprostředně před impregnací v autoklávu suché nebo vysušené. Impregnace dřeva způsobem VAD a VDV pomocí speciálního zařízení poskytuje nejlepší výsledek podle parametrů protipožární ochrany.

Jednou z nejnovějších metod impregnování dřeva je zlepšení kvality impregnace pomocí ultrazvukových nebo mikrovlnných vln. Zatím pro tuto metodu nebyla vyvinuta technologie, která by vyhovovala tomuto způsobu impregnování. Tato metoda by však mohla být v budoucnu schopna konkurovat autoklávové metodě.

U všech metod a technologií impregnování musí být dřevo před procesem impregnace připraveno. Přípravné operace zahrnují třídění, odkorňování, sušení, mechanické zpracování. Některé z těchto operací jsou ve všech případech nezbytné, zatímco jiné se provádějí pouze při určitých metodách impregnace nebo při použití určitých druhů dřeva (Unistroy, 2017).

3.7. Vliv termických úprav na vlastnosti dřeva

3.7.1. Fyzikální vlastnosti termodřeva

Během výroby termicky modifikovaného dřeva dochází ke změnám, které je důležité pozorovat. Mezi tyto změny můžeme zařadit hygroskopicitu, rozměrovou stálost, hustotu a barvu. Dochází i k dalším změnám například tepelně izolačních vlastností, akustických vlastností a dalším.

3.7.1.1. Hygroskopicita

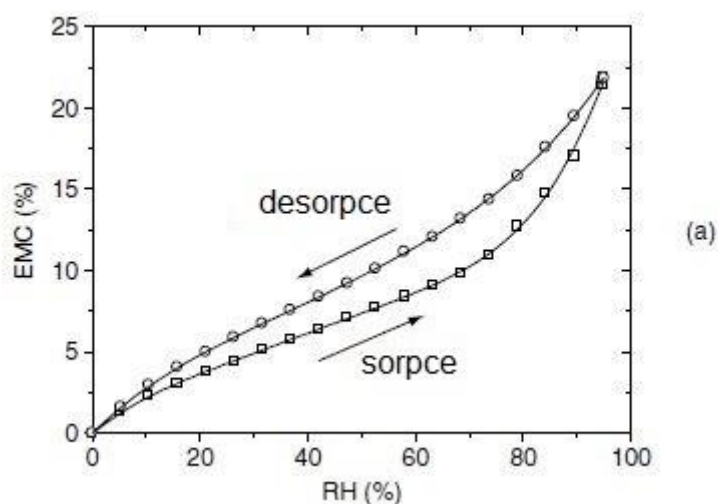
Hygroskopicita dřeva se vlivem termického působení snižuje. Hygroskopicitou dřeva se rozumí jeho schopnost přijímat a odevzdávat vodu do okolního prostředí při definované rovnovážné vlhkosti a teplotě vzduchu. Z tohoto důvodu je hygroskopicita důležitá vlastnost, která ovlivňuje vlastnosti dřeva, a to hlavně rozměrovou stabilitu a odolnost vůči škůdcům. Hygroskopicita je reprezentována rovnovážnou vlhkostí dřeva. Dřevo upravené termickou úpravou má v porovnání s rostlým dřevem menší hygroskopicitu. (Cooper, 2002; Awoyemi, 2006).

Jedním z velmi důležitých faktorů ovlivňujících proces termické modifikace dřeva je voda obsažená ve hmotě dřeva a její následný pohyb během změn při termické úpravě. Voda ve dřevě je rozdělena na vodu volnou a vodu vázanou. Voda volná se vyskytuje v mezibuněčných prostorách, kde vyplňuje lumeny dřeva. Lumen je prostor mezi základní stavební jednotkou dřeva. Voda vázaná se vyskytuje v buněčných stěnách a má velmi významný vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. Mez nasycení buněčných stěn nebo mez hygroskopicity je rozmezí mezi vodou volnou a vodou vázanou. Jedná se o mez, při které jsou stěny plně nasyceny vodou vázanou a lumeny zůstávají suché. Jak již bylo zmíněno, tak lumenem nazýváme vnitřní prostor buňky. Nejběžněji se pohybuje tato hranice okolo 30 %. Mez hygroskopicity je závislá na druhu dřeva a množství pryskyřice, které dané dřevo obsahuje. U listnatých dřevin je důležité, zda se jedná o dřevinu roztroušeně nebo kruhovitě pórovitou (Horáček, 1998).

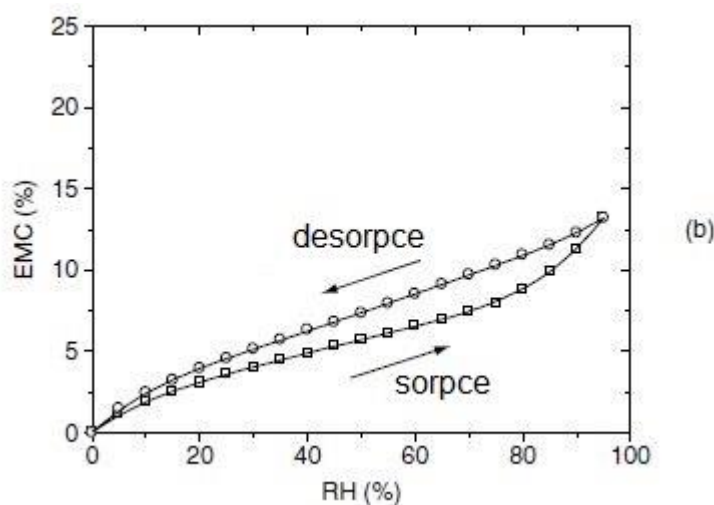
Výraznější pokles hygroskopicity je možné pozorovat při použití vyšších teplot během úpravy a delších expozičních časech. Tento pokles je možné zdůvodnit několika jevy a to:

- Odbourání určitého podílu hemicelulóz,
- odbourání nebo prostorová blokáce hydrofilních - OH funkčních skupin,
- migrace a redistribuce lipidních a jiných hydrofobních látek.

Na (obrázku č. 5) je možné sledovat, že křivky sorpčně-desorpční hysterze termicky modifikovaného dřeva jsou plošší a zároveň dosahují nižší maximální hodnoty bodu nasycení vláken – BNV. Hodnota BNV se snižuje o 30 – 70 %. Například Keith a Chang stanovili hodnotu BNV u čtyř listnatých dřevin zahříváných v atmosféře cirkulujícího vzduchu při teplotě 220 °C a délce trvání 2 hodiny na hodnotu 50 % (Keith a Chang, 1978). K podobným poznatkům dospěli i (Bengtsson a kol., 2002). Tito u dřeva termicky upraveného metodou ThermoWood nebo u dřeva upraveného retifikačním procesem zjistili nižší hodnoty rovnovážné vlhkosti - RV. Při běžných interiérových klimatických podmínkách (teplota $t = 20$ °C a relativní vlhkost vzduchu $\phi = 60 - 65$ %) byly hodnoty RV v oblasti 3 - 5 %. Tato hodnota je přibližně třikrát nižší než hodnota u rostlého dřeva.



Obrázek 4 - Sorpčně-desorpční hysterze rostlého dřeva (Hill, 2006)



Obrázek 5 - Sorpčně-desorpční hysterze termicky modifikovaného dřeva (Hill, 2006)

3.7.1.2. Rozměrová stabilita

Jednou z požadovaných vlastností termicky modifikovaného dřeva je zlepšená rozměrová stabilita. To znamená, že se při změnách relativní vlhkosti vzduchu mění jeho rozměry méně než u rostlého dřeva. Zlepšení rozměrové stability dřeva nám charakterizuje parametr ASE - Anti-swelling efficiency (účinnost vůči bobtnání).

$$ASE = ((\beta_{rost} - \beta_{mod}) / \beta_{rost}) * 100 \quad (\%)$$

β_{rost} – koeficient objemového bobtnání rostlého dřeva

β_{mod} – koeficient objemového bobtnání modifikovaného dřeva

Na základě mnoha starších i novějších experimentů ohřevu dřeva v atmosféře vzduchu nebo v atmosféře dusíku při teplotách 150 - 300 °C lze konstatovat, že má dřevo maximální hodnoty jeho rozměrové stability při dosažení úbytku hmotnosti 15 - 20 % (Stamm a kol., 1946; Seborg a kol., 1953; Stamm a Baechler, 1960). Potvrzujícím příkladem těchto poznatků může být to, že termicky modifikované dřevo typu ThermoWood, u kterého bobtnání a zpětné vysušení dosahuje pouze 50 – 90 % z hodnot původního dřeva. Toto odpovídá hodnotě ASE = 10 – 50 % (Jämsä a Viitanimi, 2003).

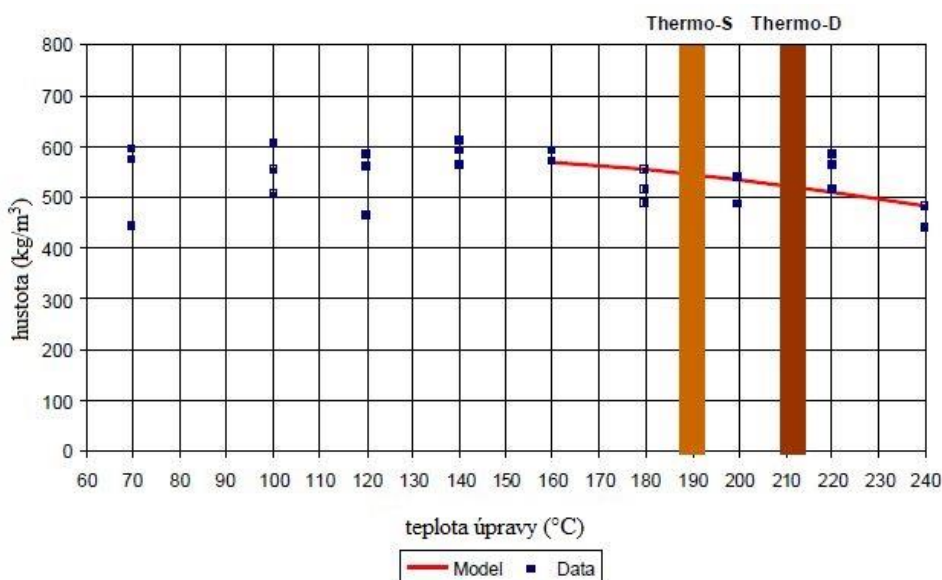
Podobně jako snížení hygroskopicity je i zlepšení rozměrové stability u termicky modifikovaného dřeva možné zdůvodnit částečným odbouráváním hemicelulóz. Nelze také vyloučit jiné vlivy, jako například tvorbu esterových a éterových vazeb v ligninu. Díky tomu je struktura buněčných stěn u dřeva, které je termicky modifikované, odolnější vůči vnikání molekul vody (Hill, 2006).

V porovnání s neošetřeným dřevem se rozměrové změny snižují dokonce o 80 – 90 %. Tyto hodnoty jsou závislé na stupni tepelného zpracování. Díky tepelné modifikaci dřeva se výrazně redukuje tangenciální a radiální bobtnání. Prohnutí, kroucení a jiné deformace materiálu jsou v porovnání s běžně sušeným dřevem v komorových sušárnách menší (Prokom, 2020).

3.7.1.3. Hustota

Objem dřeva se během termické modifikace vlivem odbourávání složek dřeva, a to hlavně hemicelulózy a některých doprovodných látek, zmenšuje, ale ne v takové míře jako se zmenšuje jeho hmotnost. Toto se odráží na mírném poklesu hustoty takto upraveného dřeva (Mayes, 2003).

Hustota je stanovena měřením hmotnosti a rozměrů zkušebních vzorků. ThermoWood má nižší hustotu než neošetřené dřevo. Toto je způsobeno hlavně v důsledku změn hmotnosti vzorku během jeho termické úpravy, kdy dochází k jejímu úbytku. Jak je možné vidět z obrázku č. 6, hustota upraveného dřeva (borovice) klesá při použití vyšších teplot během termické úpravy. Odchylka je však vysoká a koeficient jejího stanovení je nízký kvůli přirozeným změnám v hustotě dřeva (Mayes, 2003).



Obrázek 6 - Vliv termické úpravy na hustotu (Mayes, 2003)

3.7.1.4. Barva a vůně

Pro termicky modifikované dřevo je charakteristická jeho barva a vůně. Dřevo se vlivem působení vyšších teplot během modifikace zbarvuje do žluto-hnědých až hnědo-červených odstínů. Prodlužováním času působení teploty a jejím zvyšováním dochází k tmavšímu zbarvení. Rozdíl odstínu je také způsoben prostředím, ve kterém k modifikaci dochází. Dřevo upravované v atmosféře vzduchu je intenzivněji zbarveno oproti dřevu upravovanému v prostředí dusíku. K netradičním změnám barvy může docházet například během tepelné úpravy, která probíhá v prostředí s rostlinnými oleji (Reinprecht a kol., 1992; Bekhta a Niemz, 2003).

Termicky modifikované dřevo Thermowood dosahuje v celém průřezu pravidelného hnědého zbarvení. Barva v průběhu času bledne v důsledku účinku vnějších vlivů, a to především ultrafialového záření slunce a povětrnosti. Při použití v exteriéru může být vyblednutí nebo zešednutí barvy způsobené sluncem zmírněno povrchovou úpravou obsahující pigment a UV-filtr. Při použití v interiéru nejsou změny tak velké, ale vyblednutí barvy lze časem také pozorovat. Povrchová úprava, jako je lakování, voskování nebo použití olejů, udržuje životnost např. podlahových krytin a napomáhá údržbě povrchů (Prokom, 2020).



Obrázek 7 - Barevné změny termicky modifikovaného dřeva (Prokom, 2020)

Pro termicky modifikované dřevo je charakteristické, že po úpravě získává vůni velmi podobnou karamelu. Příčinou tohoto zápachu je únik prchavých organických produktů (VOC), které vznikají rozkladem hemicelulóz (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Pokud se na výrobek termicky modifikovaný metodou ThermoWood aplikuje povrchová úprava, tak jeho vůně zmizí a následně se již nevrátí. Pokud se ThermoWood používá bez povrchové úpravy, tak se jeho vůně postupně rozptyluje, dokud nedosáhne úrovně, kdy již není vůbec cítit (Mayes, 2003).

3.7.1.5. Akustické vlastnosti

U termicky modifikovaného dřeva byly zjištěny zajímavé akustické vlastnosti, které je možné využít u hudebních nástrojů. Podmínky termické úpravy se však liší od běžného procesu, a to užíváním nižších teplot během úpravy. Struktura a vlastnosti takto termicky upraveného dřeva jsou téměř identické se dřevem, které je dlouhodobě přirozeně sušeno a skladováno. Vyznačují se mírným nárůstem hodnoty Yangovo modulu pružnosti (Barlow, 1997). Akustické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva se často podobají vlastnostem dřeva vzácných historických hudebních nástrojů. Toho je využíváno při jejich restaurování (Pfriem a kol., 2005).

3.7.1.6. Tepelně-izolační vlastnosti

Jednou z důležitých fyzikálních vlastností je z hlediska použití termicky modifikovaného dřeva jeho tepelná vodivost. Tato vlastnost je u termicky modifikovaného dřeva oproti neupravenému dřevu o 10 – 30 % nižší. U materiálu ThermoWood jehličnatého dřeva zařazeného do třídy Thermo-D je hodnota jeho tepelné vodivosti 0,099 W/m·K. V porovnání s tím je podle finského stavebního kódu hodnota tepelné vodivosti pro neupravené dřevo, které je zařazeno v sekci C4, 0,12 W/m·K. Díky snížené hodnotě tepelné vodivosti je vhodné použití termicky upraveného dřeva jako materiálu pro výrobu venkovních dveří, oken, výrobu terasových obkladů, obkladů budov a další široké spektrum výrobků určených pro použití v exteriéru (Mayes, 2003). V (tabulce č. 4) lze vidět, že hodnoty termicky upraveného dřeva buku, jedle a divoké třešně jsou v porovnání s termicky modifikovaným smrkem vyšší. Dále můžeme vidět, že během tepelné modifikace těchto dřevin byla použita nižší teplota a kratší časy.

Tabulka 4 - Tepelně-izolační vlastnosti termicky upraveného dřeva (Proligno, 2021)

zdroj	metoda termické úpravy	dřevina	parametry termické úpravy	ztráta hmotnosti %	tepelná vodivost upraveného dřeva λ W/m·K	snížení tepelné vodivosti ve srovnání s neošetřeným dřevem stejného druhu %
ThermoWood Handbook (2003)	ThermoWood	smrk	230 °C/3h 230 °C/5h	5,8 9,3	0,097 0,082	11,8 25,0
		borovice	231 °C/3h 230 °C/5h	8,7 12,1	0,107 0,101	17,7 22,3
Kol and Sefil (2011)	ThermoWood	jedle	170 °C/2h 212 °C/2h	nespecifikováno	0,127 0,119	2,0 9,0
		buk	171 °C/2h 212 °C/2h		0,179 0,119	2,0 16,0
Korkut et al. (2013) Korkut and Aytin (2015)	ThermoWood	divoká třešeň	212 °C/1,5h 212 °C/2,5h	12,42 18,7	0,115 0,110	18,4 29,0
Niemz et al. (2010)	Vacuum-press dewatering method	jasan	240 °C/80mbar	nespecifikováno	0,128 0,123	6,5 10,2
		buk			0,122 0,109	12,2 21,6

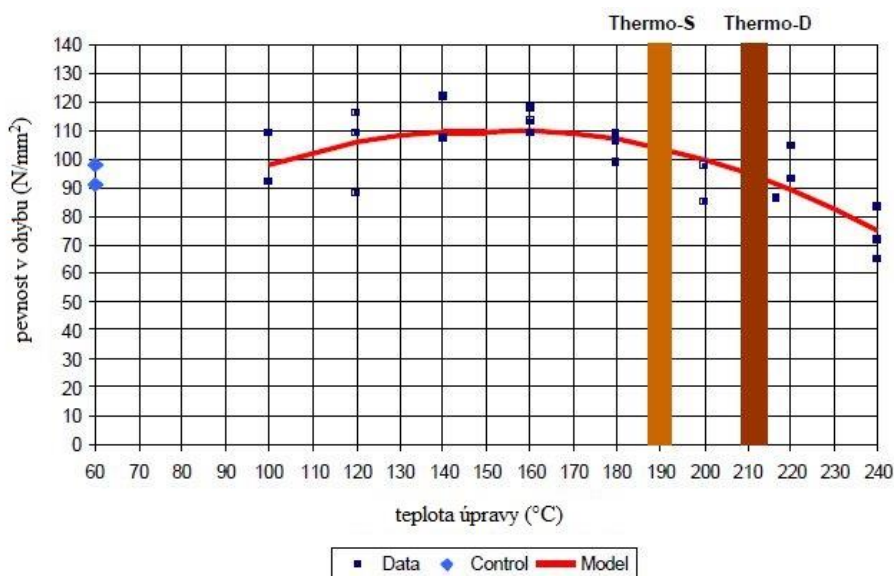
3.7.2. Mechanické vlastnosti termodřeva

Je známo, že u termicky modifikovaného dřeva dochází ke zhoršení mechanických vlastností, a to zejména pevnosti, tvrdosti a rázové houževnatosti. Naopak u některých vlastností dochází ke zlepšení. Mezi tyto vlastnosti můžeme zařadit například modul pružnosti. U termicky modifikovaného dřeva při dlouhodobém působení teploty vyšší než 160 °C se však zhoršuje i modul pružnosti (Požgaj a kol., 1997). Obecně platí, že na míru poklesu mechanických vlastností mají vliv hlavně tyto parametry během termické modifikace: teplota, čas, prostředí termické úpravy, vlhkost a druh upravovaného materiálu (Reinprecht a Vidholdová, 2008). Míra velikosti poklesu pevnosti a houževnatosti termicky modifikovaného dřeva se odvíjí od stupně narušení jeho stavebních polymerů. K tomuto dochází depolymerizací, kondenzací, odbouráváním a jinými metodami, které probíhají nejen v hemicelulózách, ale i v ostatních složkách dřeva. Během modifikací, při kterých je ohříváno mokré dřevo, dochází k plastifikačnímu efektu ve stavbě ligninu. Vlivem těchto fyzikálně-mechanických změn je pevnost takto ohřátého mokrého dřeva velmi snížena, ale po jeho následném vysušení nabyde materiál svoji původní pevnost. Tohoto jevu je využíváno během výroby ohýbaného nábytku (Militz, 2002). Snížování pevnosti a houževnatosti termicky modifikovaného dřeva je závislé na konkrétním použitém procesu modifikace (Rapp a Sailer, 1997; Hale a kol., 2002).

3.7.2.1. Pevnost v ohybu

Úprava dřeva při vysokých teplotách vede ke snížení pevnosti, houževnatosti a odolnosti proti oděru (Chang a Keith, 1978). Snížení mechanických vlastností v důsledku vysokoteplotního zpracování vedlo k vývoji dvoustupňového Platónova procesu, u kterého se tvrdí, že snížení pevnosti je minimalizováno prováděním modifikace při teplotách pod 200 °C (Boonstra et al., 1998). Ztráta pevnosti je silně ovlivněna typem použitého tepelného zpracování. Ztráta pevnosti je rychlejší v uzavřených systémech ve srovnání s otevřenými systémy (Bhuiyan et al., 2000). Tvrdé dřeviny vykazují při termické modifikaci za stejných podmínek vyšší ztráty pevnosti než měkké dřeviny (Chang a Keith, 1978). Pevnost dřevěného materiálu má obecně silnou korelaci s hustotou a ThermoWood má po ošetření mírně nižší hustotu, proto je zřejmé, že ThermoWood má v některých případech nižší hodnoty pevnosti. Nicméně, poměr hmotnosti k pevnosti může zůstat prakticky nezměněn. Pevnost dřeva je také velmi závislá na obsahu relativní vlhkosti pod bodem nasycení vláken. Data

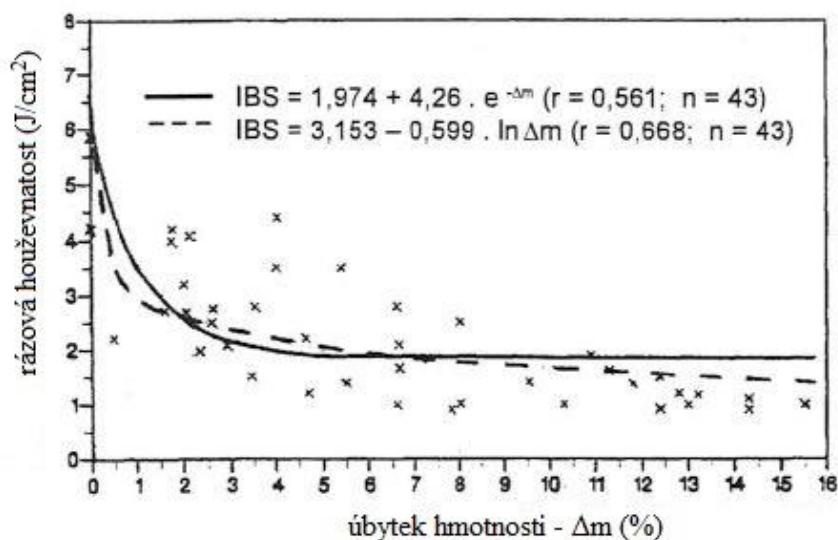
prezentovaná v obrázku č. 8 byla naměřena u termicky modifikovaných vzorků borovice. Je možné zde pozorovat, že při teplotě modifikace 210 °C dřevo značně ztrácí pevnost v ohybu (Mayes, 2003).



Obrázek 8 – Vliv termické úpravy na pevnost v ohybu (Mayes, 2003).

3.7.2.2. Rázová houževnatost

Snížení rázové houževnatosti se rozumí jako zvýšení křehkosti materiálu. Rázová houževnatost některých dřevin modifikovaných při vysokých teplotách může klesnout až o několik desítek procent (Boonstra a kol., 2007). V roce 1953 byl vědci stanoven pokles rázové houževnatosti 90 % s úbytkem hmotnosti $\Delta m = 30\%$ u dřeva termicky modifikovaného při velmi vysoké teplotě 300 °C (Seborg a kol., 1953). Reinprecht v roce 1992 zjistil velmi výrazný pokles houževnatosti (IBS – impact bending strength) při chemicko-termické úpravě topolového dřeva za přítomnosti kyseliny sírové. Tento výrazný pokles houževnatosti však doprovázel jen poměrně malý úbytek hmotnosti (Δm) (Reinprecht a Vidholdová, 2008).



Obrázek 9 - Exponenciální pokles rázové houževnatosti dřeva po termické modifikaci vzhledem k úbytkům hmotnosti (Reinprecht, 1992)

3.7.2.3. Tvrdost dřeva

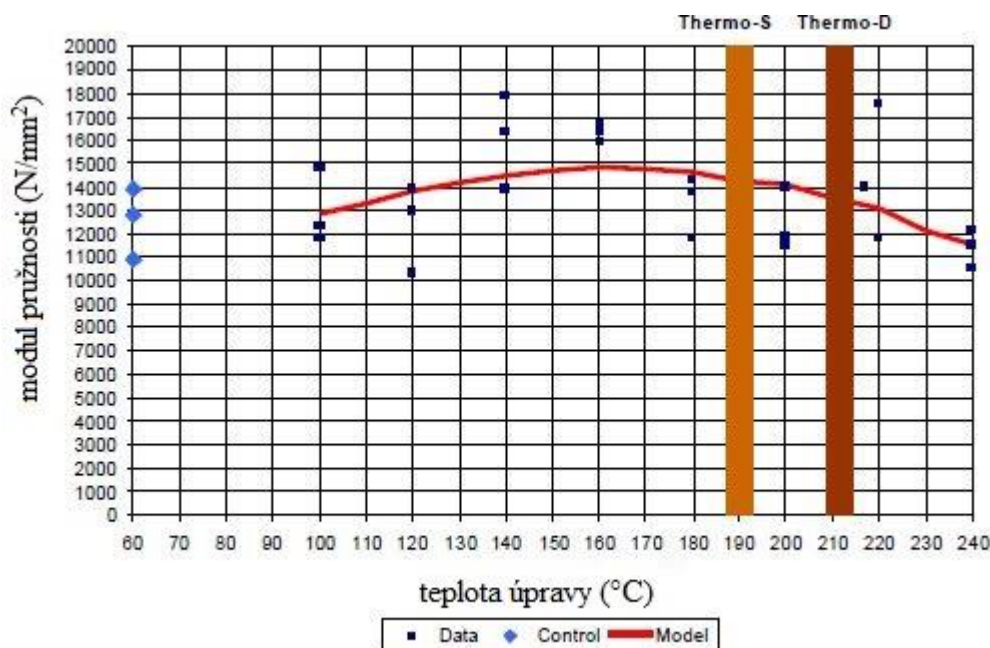
Do tvrdosti dřeva se vliv teploty v rozsahu 100 – 240 °C během termické modifikace nijak zvláště nepromítá. Dokonce se hodnoty této vlastnosti nepatrně zvyšují, ale v praxi je to jen zanedbatelné zlepšení (Mayes, 2003).

3.7.2.4. Pevnost v tlaku, tahu a smyku

Ve finském výzkumném ústavu VTT bylo zjištěno na smrkových vzorcích, které byly vystaveny po dobu 1 – 3 hodin teplotě 220 °C, že tlaková pevnost podél vláken neklesá a naopak může i v malé míře narůstat (Mayes, 2003). K podobnému závěru dospěli během svého výzkumu i Reinprecht a Vidholdová, kteří použili k termické úpravě buku řepkový olej, a to za teploty 180 – 220 °C. Při zatěžování se takto upravené dřevo oproti dřevu sušenému v sušárně při maximálním zatížení rozpadlo na malé kusy. Toto můžeme přisuzovat snížené houževnatosti (Reinprecht a Vidholdová, 2008). Tahová pevnost termicky modifikovaného dřeva klesá podobně jako pevnost v ohybu (Hale a kol., 2005). Při termické úpravě borovice a smrku za teplot 190 – 230 °C po dobu 4 hodin byl zjištěn 1 – 40% pokles smykové pevnosti v radiálním a tangenciálním směru. Modifikace při nižší teplotě 190 °C měla na hodnoty smykové pevnosti u borovice velmi malé, ale smrk vykazoval hodnoty 1 – 20 %. Tyto hodnoty se odvíjejí od podmínek použitých během termické modifikace (Mayes, 2003).

3.7.2.5. Modul pružnosti

Mnoho studií ukázalo, že při tepelném působení na dřevo během termické modifikace dochází k mírnému zvýšení modulu pružnosti, pokud je dřevo vystaveno teplotám krátkou dobu. Pokud je na dřevo působeno vyšší teplotou delší dobu, tak dochází ke snížení modulu pružnosti. Rychlost a rozsah je závislý na teplotě zpracování a dalších podmínkách. Během výzkumu tepelné degradace buku a borovice při různých teplotách a čase bylo zjištěno, že i při poklesu síly a práce maximální zátěže byl modul pružnosti přímo úměrný úbytku hmoty bez ohledu na druh modifikace. Pokles modulu pružnosti se stal významným až tehdy, když hodnota úbytku hmotnosti přesáhla 8 % (Rusche, 1973). Při tepelné modifikaci dřeva, během které je užito podílu agresivních chemikálií, dochází k poklesu hodnot modulu pružnosti okamžitě. Působením teplot vyšších než 160 °C dochází ke snižování modulu pružnosti už při kratších časech ohřevu (Reinprecht., 1996).

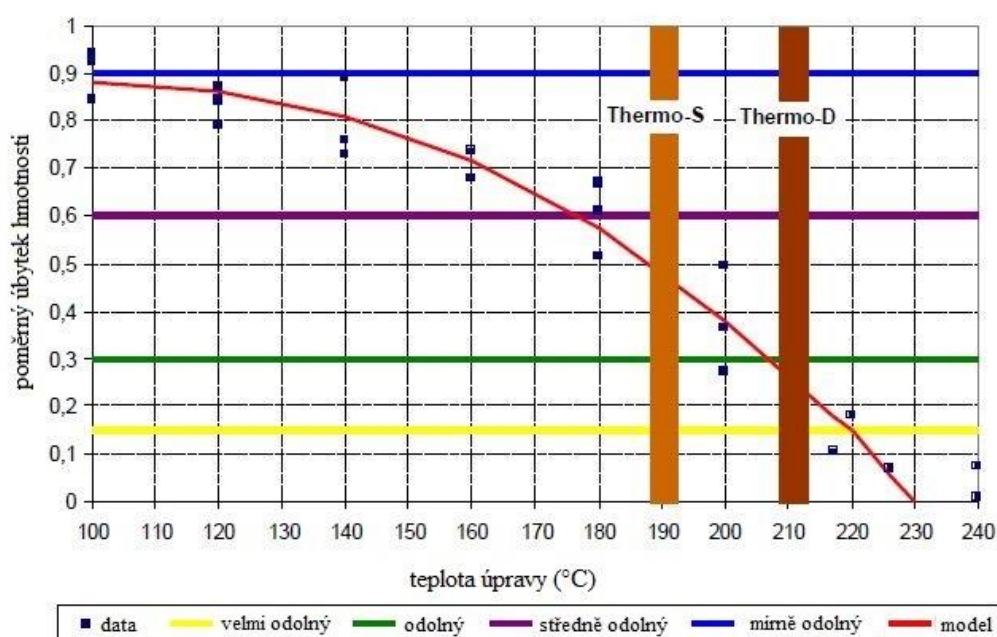


Obrázek 10 – Vliv teploty termické modifikace na modul pružnosti borovice (Mayes, 2003).

3.7.2.6. Biologická odolnost

Lepší biologická odolnost termicky modifikovaného dřeva je obecně připisována změnám v chemické struktuře dřeva. Jednou z hlavních příčin je snížení podílu funkčních – OH skupin a zvýšení hydrofobnosti dřeva. Toto je následkem kondenzačních a jiných reakcí. Pomocí těchto reakcí dochází ke snížení sorpční kapacity a tím i snížení vlhkosti dřeva, která už nevyhovuje životu biologických škůdců.

Vlhkost potřebná pro přežití hmyzu je ($W_{\min} = 10 \%$), pro přežití hub ($W_{\min} = 20 \%$) (Tjeerdsma a kol., 1998, 2000; Boonstra a Tjeerdsma, 2006). Dalším důvodem zlepšení biologické odolnosti termicky modifikovaného dřeva je odbourání určitého podílu hemicelulóz ze struktury dřeva, které jsou nejvhodnější pro hmyz a houby (Reinprecht, 1996; Militz, 2002; Weiland a Guyonnet, 2003). Na obrázku č. 11 můžeme pozorovat zvýšení trvanlivosti dřeva borovice termicky upravené metodou ThermoWood při teplotách 100 – 240 °C po dobu 3 hodin. Je zde patrné snížení jejího poměrného úbytku hmotnosti při hnilobě houby *Coniophora puteana* podle ČSN EN 113 vzhledem k neupravenému dřevu.



Obrázek 11 - Vliv termické úpravy dřeva na jeho biologickou odolnost (Mayes, 2003).

3.7.2.7. Protipožární odolnost

Protipožární odolnost termicky modifikovaného dřeva se od běžně rostlého dřeva příliš neliší. Tato vlastnost byla předmětem mnoha zkoušek prováděných dle norem EN 13823, ISO 5660 a BS 476/7. Bylo zjištěno, že dřevo upravené procesem OHT má částečně sníženou odolnost vůči šíření plamene. Je to způsobeno zachycením zbytků vosků a rostlinných olejů v lumenech buněk dřeva. Dále bylo vyzkoušeno, že při hoření termicky modifikovaného dřeva je tvorba dýmu menší než u neupraveného dřeva (Garcia a kol., 2008).

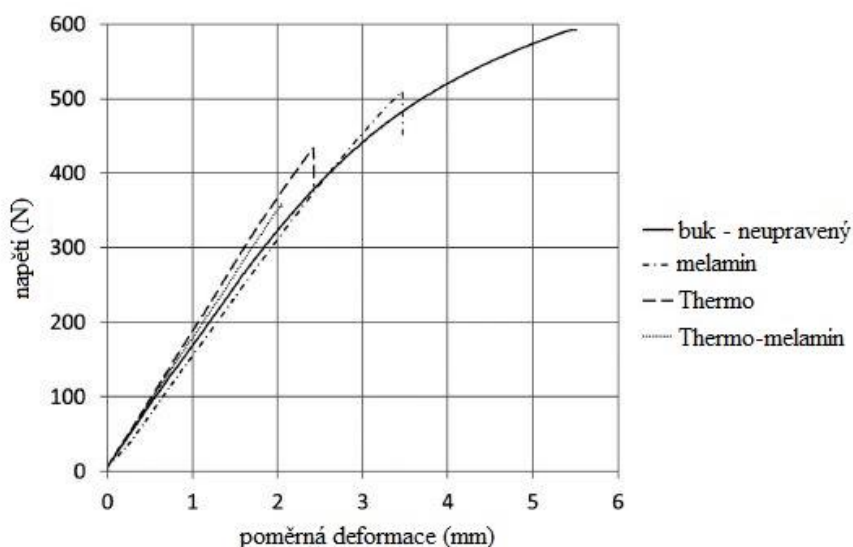
3.8. Vliv impregnace a následné termické modifikace na vlastnosti dřeva

3.8.1. Tvrdost

Při vědeckých výzkumech bylo zjištěno, že impregnování dřeva melaminovou pryskyřicí vedlo ke zvýšení jeho tvrdosti. Během výzkumu byly zkoumány dřeviny: buk, jasan, lípa a topol. Zkoumané vzorky byly impregnovány roztokem MMF (Madurit celobuněčný). Impregnační proces probíhal ve vakuu 60 mbar po dobu 0,5 h, následovala tlaková fáze, která trvala 2 h při tlaku 12 bar. Vzorky byly následně sušeny na vzduchu (24 hodin) a poté vytvrzeny v laboratorní peci. Materiál byl tepelně upraven ve vakuu. Při této úpravě sloužily vyhřívané ocelové desky jako médium přenosu tepla. Délka úpravy byla 7,5 h a maximální teplota byla 230 °C. Tvrdost dřeva po impregnaci melaminovou pryskyřicí a následné termické úpravě byla u všech těchto dřevin kromě topolu vyšší oproti neupravenému dřevu. Tvrdost materiálu se odvíjí od jeho hustoty. Proces samotné termické úpravy snižuje hustotu materiálu a dřevo termicky upravené tak může dosahovat nižší tvrdosti, proto byl zkoumán vliv kombinace impregnování a následné termické impregnace na tvrdost dřeva, díky kterému byl prokázán kladný vliv na tvrdost dřeva takto upraveného. (Behr, 2018).

3.8.2. Mez pevnosti

Tepelná úprava snížila mez pevnosti všech čtyř zkoumaných druhů dřevin. Kombinace impregnace melaminovou pryskyřicí a následná termická úprava nezlepšily hodnoty meze pevnosti. Impregnační vzorků dřeva byla mez pevnosti oproti kombinaci metod a termické modifikaci zvýšena s výjimkou buku. Hodnota meze pevnosti impregnovaného dřeva však nepřesáhla hodnotu meze pevnosti dřeva bez úprav (Behr, 2018).



Obrázek 12 - Mez pevnosti impregnovaného a termicky upraveného dřeva (Behr, 2018)

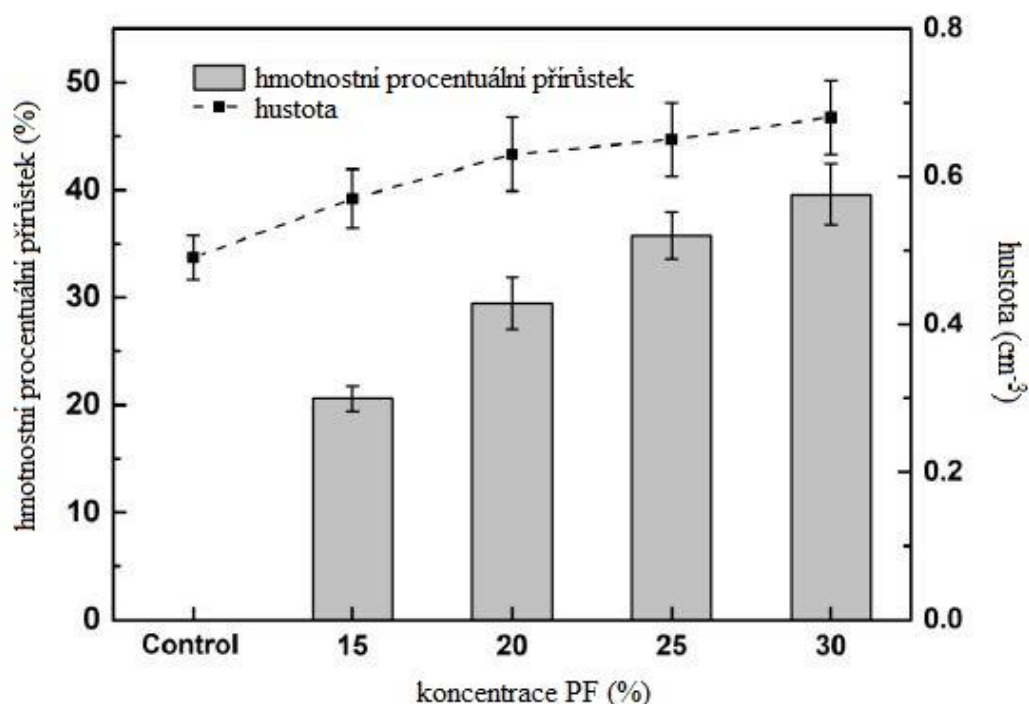
3.8.3. Protipožární odolnost

V průběhu času byla objevena řada druhů retardérů hoření. Většina retardérů hoření dřeva je založena na fosforu, dusíku a boru. Některé látky, které zpomalují hoření dřeva, mají zároveň negativní dopad na dřevo, jako například degradace pevnostních vlastností dřeva v synergii s vysokou teplotou prostředí a vysokou koncentrací kyselin. Jednou ze současně zkoumaných metod je impregnace melaminovou pryskyřicí a následná termická modifikace metodou ThermoWood. Nebylo zjištěno, že by melamin způsoboval podobné problémy jako výše zmíněné tradiční retardéry hoření. Melamin se používá jako přísada zpomalující hoření i v jiných aplikacích, jako jsou například plasty. Kombinace impregnace a tepelné modifikace během výzkumů zpomalily rychlost uvolňování tepla. Touto kombinací se zároveň snížila hodnota produkce kouře během hoření. Kombinovaná úprava také zvýšila množství zbytkové hmoty po spalování. Bylo dosaženo závěru, že impregnace

melaminem a tepelná úprava nejeví negativní dopad na požární vlastnosti dřeva. Snížené množství kouře by mohlo přispět k větší šanci na přežití při požáru v závislosti na toxicitu kouře (Lahtela a Kärki, 2016).

3.8.4. Hustota a hmotnost

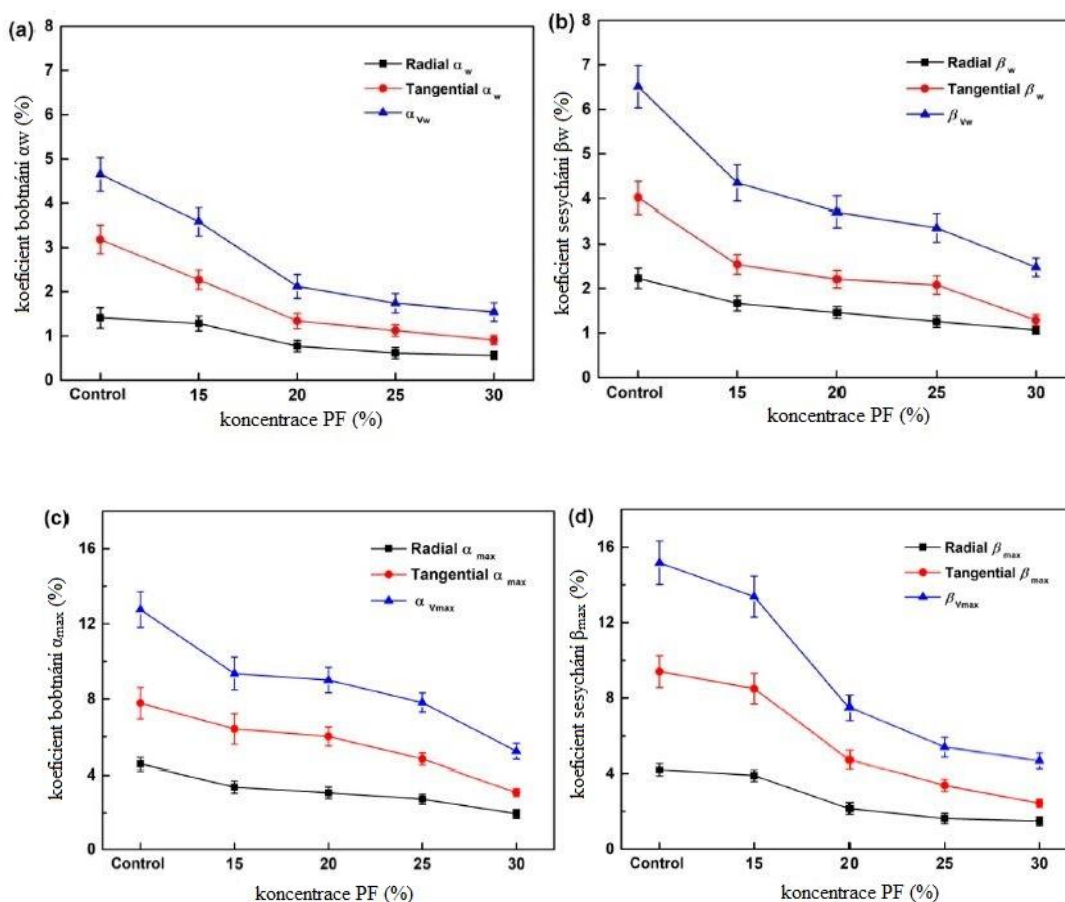
Zvýšení hmotnosti a hustoty dřeva impregnovaného fenolformaldehydovou pryskyřicí popisuje obrázek č. 13. Je zde popsán hmotnostní procentuální přírůstek a hustota kontrolních a upravených vzorků dřeva. Lze pozorovat, že hmotnostní procentuální přírůstek (WPG) a hustota rostou se zvyšující se koncentrací fenolformaldehydu (PF). Hustota pozitivně korelovala s WPG, který se postupně zvyšoval o 34,7 % a 39,6 % ve srovnání s referenčními vzorky. V předchozích studiích bylo zjištěno, že viskozita roztoku ovlivňuje pronikání látky do dřeva (Wang, 2019).



Obrázek 13 - Zvýšení hmotnosti a hustoty dřeva impregnovaného fenolformaldehydovou pryskyřicí (Wang, 2019)

3.8.5. Rozměrová stabilita

Koeficienty bobtnání a sesychání (α a β) referenčních a impregnovaných vzorků dřeva za různých vlhkostních podmínek jsou uvedeny v grafech níže. Koeficienty bobtnání a sesychání dřeva se změnou obsahu vlhkosti mezi sušením v sušárně a sušením na vzduchu (α_w a β_w) byly primárně měřeny za účelem vyhodnocení rozměrové stability dřeva, které je používáno na místech s nízkým obsahem rovnovážné vlhkosti. Radiální, tangenciální a objemové bobtnání dřeva modifikovaného PF pryskyřicí s 20% koncentrací byly asi o 45 %, 58 % a 54 % nižší než u neupraveného dřeva. Na obrázcích *c* a *d* je možné pozorovat účinek impregnování PF pryskyřicí, kde jsou α_{max} a β_{max} podobné jako u α_w a β_w . Hodnoty radiálního, tangenciálního a objemového sesychání dřeva modifikovaného PF pryskyřicí při 20 % koncentraci se snížily asi o 49 %, 50 %, a 51 %. Kromě toho byly α_{max} i β_{max} téměř dvakrát vyšší než α_w a β_w . Tyto rozdíly je možné připsat rozdílnému obsahu vlhkosti (Wang, 2019).



Obrázek 14 - Rozměrová stabilita dřeva impregnovaného fenolformaldehydovou pryskyřicí (Wang, 2019)

4. Metodika

4.1. Výběr a příprava vzorků pro výzkum

Pro provádění výzkumné části práce byla vybrána dřevina buk. Před zahájením samotné výzkumné části bylo zapotřebí vyrobit zkušební tělesa, která měla dle normy ČSN EN 310 rozměry 20x20x300 mm. Pro zhotovení těchto zkušebních těles byly opatřeny bukové fošny o tloušťce 55 mm. Celkem bylo vyrobeno 8 sad paralelních vzorků. Z každé lamely tedy bylo vyrobeno 8 zkušebních tělísek. Vzorky byly systematicky číslovány, aby bylo při porovnání naměřených dat jasné, z jaké jsou fošny a z jaké jsou lamely. Jednotlivá zkušební tělesa měla vždy jasně dané uspořádání na jednotlivých lamelách. Všechny operace byly prováděny na strojích a zařízeních, kterými disponuje truhlářská dílna FLD. Po zhotovení zkušebních těles následovalo jejich vizuální zkontrolování a vyřazení takových sérií, ve kterých byl vzorek s jakoukoliv nepřipustnou vadou pro následující výzkum. Poté byla tělesa, která prošla vizuální kontrolou, rozříděna do jednotlivých skupin podle kódování. První skupina byla určena jako referenční bez jakékoliv modifikace (značeno BK). Druhou skupinu tvořila tělesa určená pouze pro impregnování v poměru 1:9 (1 díl impregnační látky a 9 dílů vody) bez termické úpravy (značeno BK+1:9). Ve třetí skupině byla tělesa určená pouze pro termickou úpravu (210 °C) a to bez jejich předchozí impregnace (značeno BK+210 °C). Čtvrtá skupina zkušebních těles byla určena jak pro impregnaci v poměru 1:1 (1 díl impregnační látky a 1 díl vody), tak i pro termickou úpravu (210 °C) (značeno BK+T+1:1). Pátá skupina byla připravena pro impregnování v poměru 1:9 (1 díl impregnační látky a 9 dílů vody) a následnou termickou modifikaci (210 °C) (značeno BK+T+1:9). V šesté skupině byla tělesa určená pro impregnaci poměrem 1:2 (1 díl impregnační látky a 2 díly vody) a následnou termickou modifikaci (210 °C) (značeno BK+T+1:2). Pryskeřice Lignofen G/3/D, která byla určena pro později prováděnou impregnaci, obsahuje 48 ± 2 % sušiny. Další dvě skupiny zkušebních těles byly určeny pro případné opakování modifikace vzorků a zkoušek.

Tabulka. 5 - Značení vzorků (autor)

značení vzorků	teplota termické úpravy °C	koncentrace impregnačního roztoku
BK	x	x
BK+1:9	103 (vytvrzení)	1:9
BK+210 °C	210	x
BK+T+1:1	210	1:1
BK+T+1:9	210	1:9
BK+T+1:2	210	1:2

Dále během výzkumu již nebyly použity. Všechna takto roztríděná tělesa byla zvážena na digitální váze a následně byly měřeny jejich rozměry elektronickým posuvným měřítkem. Všechna naměřená data byla zapsána do tabulkového souboru k danému kódu zkušebního tělíska.

Z naměřených dat bylo následně možné vypočítat hustotu podle postupu, který uvádí norma ČSN 49 0108. Tato norma vymezuje základní postup spočívající ve stanovení objemu a hmotnosti dřeva při určité vlhkosti.

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

m_w – hmotnost dřeva při vlhkosti w [kg],

V_w – objem dřeva při vlhkosti w [m^3],

(ČSN 49 0108).

4.2. Impregnace

Po výrobě a roztrídění zkušebních těles následovalo impregnování těch skupin vzorků, které k tomu byly určeny. Před samotným procesem impregnování bylo nutné namíchat předem dané koncentrace impregnačních roztoků pro jednotlivé skupiny vzorků, které byly pro impregnaci určeny. Dalším důležitým krokem bylo také vyskládání jednotlivých skupin těles do plastových boxů. Bylo nutné tělesa skládat tak, aby mezi nimi byly mezery a mezi jednotlivé vrstvy těles byly vloženy proklady. Tyto mezery mezi tělesy se dělaly z toho důvodu, aby pokud možno všechny plochy zkušebních těles zůstaly v kontaktu s impregnačním roztokem a mohlo dojít k co nejlepším podmínkám při jejich impregnování. Po

vyskládání těles do plastových boxů došlo k nalití příslušného roztoku impregnační látky a vody do boxů s příslušnými vzorky (obrázek č. 15).



Obrázek 15 - Příprava vzorků pro impregnování (autor)

Impregnační látkou pro tento výzkum byla pryskyřice Lignofen G/3/D, což je fenolformaldehydová pryskyřice rozpustná ve vodě, typu rezol. Tato látka se vyrábí na neorganickém bezemisním katalyzátoru. Charakteristickou formou je tekutina tmavočervené až tmavohnědé barvy. Pryskyřice Lignofen G/3/D obsahuje 48 ± 2 % sušiny.

P.č.	Označovaný parametr	Jednotka	Hodnota	Norma
1	Vnější vzhled	čirá tekutina, bez usazenin		
2	Obsah volného formaldehydu	[%]	max. 0,2	PN-EN ISO 11402:2006 p.4,4.
3	Obsah neprchavých látek ¹⁾	[%]	$48,0 \pm 2,0$	PN-EN ISO 3251:2008
4	Obsah volného fenolu ²⁾	[%]	max. 0,1	PN-C-89044:1975
5	Viskozita ³⁾	[sek]	85 – 95	PN-C-81701:1997
6	Hustota ⁴⁾	[g/cm ³]	$1,2 \pm 0,1$	PN-EN ISO 3675:2004
7	pH	[-]	12 – 14	PN-EN ISO 8975:1999
8	Doba vytvrzování ⁵⁾	[sek]	80-120	PN-EN ISO 8987:2007

¹⁾ 105°C, 4h, 2g ³⁾ Fordův pohárek $\phi = 4$ mm, 20°C, ⁴⁾ 20°C
²⁾ kolorimetrická metoda ⁵⁾ 130°C, 0,5 cm³ pryskyřice.

Obrázek 16 - Technický list impregnační látky (autor)

Samotný proces impregnování probíhal v tlakové impregnační komoře zvané autokláv (obrázek č. 17) v laboratořích v Hi-tec pavilonu fakulty lesnické a dřevařské. Tato komora umožňuje vyvinout pracovní podtlak 80 kPa (0,8 bar) a pracovní přetlak 0,85 MPa (8,5 bar) Jednotka *bar* je zaokrouhlením fyzikálního atmosférického tlaku (*atm*). Ten je konvencí stanoven jako 101,325 kPa. Objem tohoto autoklávu je 0,4 m³.



Obrázek 17 - Tlaková impregnační komora - autokláv (autor)

Po veškerých předchozích přípravách byly plastové boxy se vzorky vloženy do impregnační komory, ta byla uzavřena a na ovládacím panelu byly nastaveny požadované hodnoty. Celý proces začal vytvořením podtlaku v nádobě autoklávu, a to na hodnotu 0,72 baru. Tento podtlak byl udržován po dobu 4 hodin. Následně byla komora natlakována, a to na 7,2 baru. Tento tlak působil na obsah autoklávu po dobu 3,5 hodiny. Po uplynutí této doby byl vnitřní pracovní tlak uvnitř autoklávu snížen na hodnotu 0 baru, a to během 15 minut. Další fází bylo opětovné natlakování na pracovní tlak 7,2 baru. Tento tlak byl v autoklávu udržován po dobu 15 hodin. Po uplynutí této doby došlo k odtlakování komory, odjištění bezpečnostního poklopu a vyzvednutí nádob s impregnovanými zkušebními tělesy. Jednotlivá tělesa byla zbavena zbytků impregnační látky a dosucha otřena.

4.3. Kontrolní vážení a vytvrzení impregnační látky

Všechny vzorky byly poté zváženy a hodnoty jejich hmotnosti byly zapsány. Toto vážení sloužilo ke zjištění rozdílu hmotnosti impregnovaného tělíska a daného vzorku před úpravou. Následně byla vypočítána hustota zkušebního vzorku dle vzorce pro výpočet hustoty dřeva při určité vlhkosti uvedeného výše. Z tohoto výpočtu hustoty bylo možné zjistit množství roztoku obsaženého ve zkušebních vzorcích po fázi tlakového impregnování. Po zvážení byla tělesa umístěna do horkovzdušné sušicí komory, kde došlo k vytvrzení impregnační látky. Toto vytvrzování probíhalo při teplotě 103 °C, dokud nedošlo k ustálení hmotnosti impregnovaných zkušebních vzorků (několika vzorků, které byly vybrány a opakovaně váženy). Po vytvrzení následovala další modifikace dřeva, a to termování.

4.4. Termická úprava

Jednou z hlavních částí mého výzkumu bylo termování zkušebních vzorků. Před zahájením samotného procesu bylo potřeba vyskládat zkušební vzorky do komory.



Obrázek 18 - Termovací komora (autor)

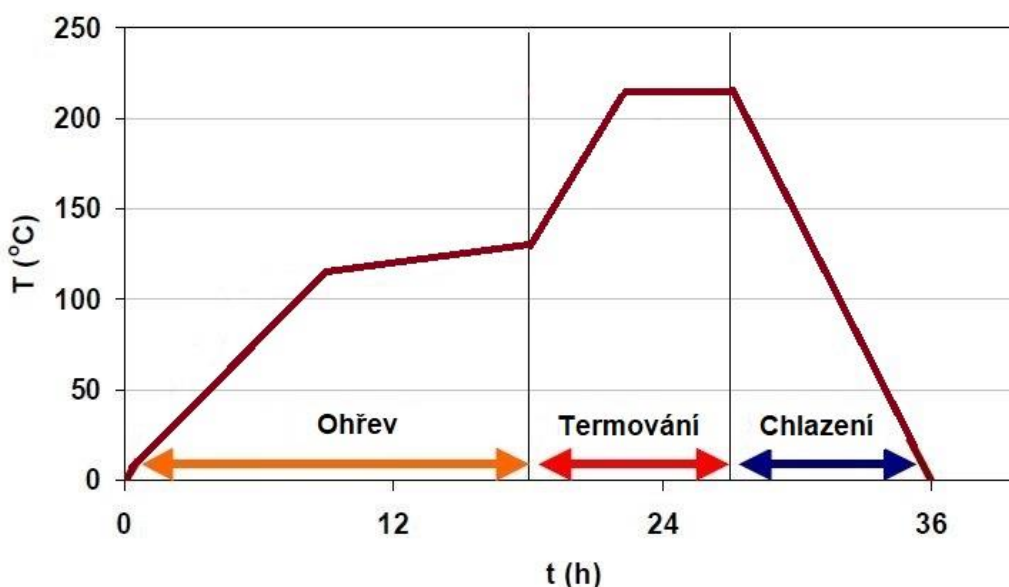
Tepelná úprava jednotlivých sérií zkušebních vzorků probíhala v laboratorní termovací komoře (obrázek č. 18) umístěné v areálu ČZU. Použitý způsob termické modifikace vychází z patentovaného principu ThermoWood, který byl použit při výrobě zkušebních vzorků pro experimentální pokusy této práce. Komora byla vyrobena firmou KATRES Jihlava a skládá se z hlavní tepelné komory s topnými tělesy a větráku, který zajišťuje vnitřní cirkulaci vzduchu. Dále je komora vybavena přívodem páry pro regulaci ohřevu a rychlosti sušení materiálu. Pro samotnou fázi úpravy je v komoře tryska, která v nastavených intervalech vstříkuje do komory vodu a vytváří tak vodní clonu, která brání dřevu v jeho samovznícení. Pro regulaci podmínek a jejich úpravu je komora vybavena dvěma teploměry materiálu a dvěma vlhkostními čidly materiálu. Tato čidla a teploměry sledují parametry úpravy. Pro sledování vnitřních podmínek je tato komora osazena jedním „suchým“ a jedním „mokrým“ teploměrem. Rozdíl jejich naměřených hodnot nám udává schopnost vnitřní atmosféry přijímat nebo odevzdávat vlhkost upravovaného materiálu. Všechny tyto parametry jsou používány k regulaci procesu s ohledem na nastavený režim modifikace. Z tohoto hlediska je nejdůležitější mít daný režim nastavený tak, aby vnitřní podmínky komory korespondovaly s vnitřními podmínkami materiálu a především s teplotou. Nastavení režimu bylo uzpůsobeno tak, aby k materiálu ve všech fázích bylo co nejšetrnější a nedošlo k porušení celistvosti zkušebních těles.

První fáze neboli ohřev začínala na teplotě 20 °C. Nastavená strmost tohoto úseku byla 10 °C za hodinu. Tato strmost ohřevu byla nastavena do bodu dosažení vyrovnané teploty v komoře, a to 110 °C. V této fázi se do komory pouštěla pára. Účelem bylo zbavit dřevo vlhkosti před finální úpravou. Volná voda ve dřevě při vyšších teplotách způsobuje praskliny materiálu. Tato fáze je přímo úměrná velikosti upravovaných těles a jejich vstupní vlhkosti. V našem případě měla vstupní tělesa vlhkost 10 %.

Druhá fáze termické modifikace započala po dosažení 110 °C v komoře. Po dosažení této teploty byla komora automaticky přepnuta do další fáze, kde byla strmost růstu teploty nastavena na 13 °C za hodinu. Tuto teplotu zvyšovala až do dosažení požadované teploty úpravy (210 °C). Tato teplota byla v komoře

udržována po dobu 3 hodin, přičemž byla do vnitřního prostoru komory vstříkována voda, která sloužila jako ochranné médium.

Třetí fáze nastala po uplynutí 3 hodin. Byl spuštěn režim ochlazení. Zpočátku dochází k prudkému ochlazení se strmostí ochlazování 15 °C za hodinu. V této fázi je důležité ochladit upravený materiál tak, aby došlo k ukončení vnitřních chemických změn. Dále už byla zkušební tělesa pozvolně ochlazována tak, aby se jejich teplota vyrovnala běžné teplotě 20 °C.



Obrázek 19 - Křivka změny teploty termické úpravy během výzkumu (autor)

4.5. Klimatizování

Po ukončení procesu termické modifikace a vyjmutí zkušebních těles z komory následovalo jejich klimatizování v klimatizační komoře Weiss umwelttechnik C2000. Pro klimatizování zkušebních vzorků byly nastaveny tyto parametry: teplota prostředí 20 °C a relativní vlhkost vzduchu 65 %. V tomto prostředí byla zkušební tělesa klimatizována, dokud nedošlo k ustálení jejich hmotnosti.

4.6. Měření a vážení zkušebních vzorků po modifikacích a klimatizování

Po uplynutí doby nutné na klimatizování vzorků bylo potřeba změřit a zvážit každé zkušební těleso. Tyto hodnoty byly zaznamenány a později použity k vyhodnocení dat výzkumu. Měření rozměrů vzorků bylo provedeno pomocí elektronického posuvného měřítka od firmy Kinex (6040-27-150)(obrázek č. 20) s automatickým zaznamenáváním naměřeného výsledku a přesností měření na 0,01 mm. Daná hodnota byla následně zapsána do údajů databáze těles. Měření rozměrů bylo provedeno na radiální, tangenciální a axiální ploše zkušebního tělíska, a to vždy ve stejném místě jako při měření před začátkem modifikací. Vážení probíhalo na laboratorní váze značky Kern (PCB 2500-2) (obrázek č. 20), a to s přesností na 0,01 g. Tato laboratorní váha rovněž zaznamenávala výsledek a převáděla tuto hodnotu do databáze.



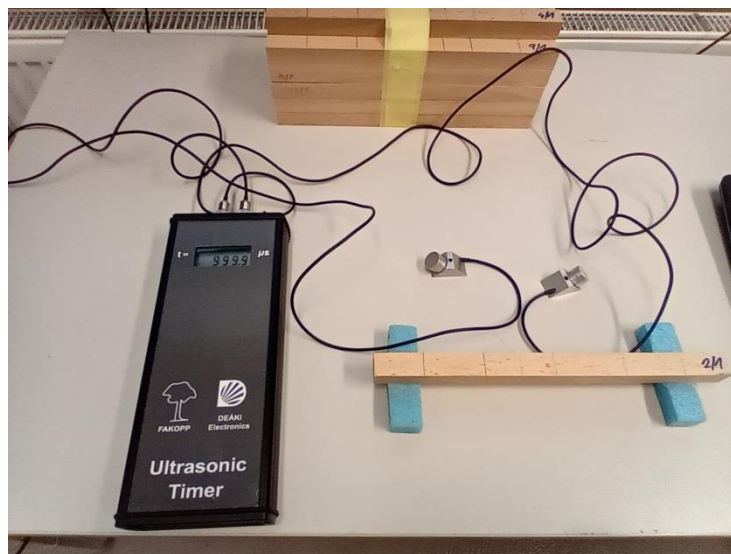
Obrázek 20 - Laboratorní váha a posuvné měřítko (autor)

Jakmile bylo dokončeno kontrolní měření a vážení, následovalo rozdělení zkušebních vzorků do dvou skupin, a to podle následné zkoušky. V první skupině byla tělesa určená pro měření dynamického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu. Druhá skupina zkušebních těles byla určena pro přerážecí práce.

4.7. Měření mechanických a fyzikálních vlastností

4.7.1. Měření dynamického modulu pružnosti

Zkouška byla prováděna na první polovině zkušebních vzorků. Jelikož se jednalo o nedestruktivní zkoušku, tak mohla být zkušební tělesa následně použita ještě pro měření pevnosti v trojbodovém ohybu. Před samotným měřením bylo nutné na zkušební tělesa narýsovat pomocné rysky, na které byly následně při měření dynamického modulu pružnosti přikládány klínovité sondy. Rysky byly narýsovány tak, aby byla vzdálenost mezi měřenými body 60 mm, 120 mm a 220 mm. Samotné měření probíhalo pomocí přístroje FAKOPP Ultrasonic Timer (UT-06/2013) (obrázek č. 21). Princip měření tohoto přístroje spočívá v měření času, za který projde UT vlna materiálem. Funkce tohoto zařízení je založena na elektronovém vybuzení v sondách, ve kterých následně dochází ke generování krátkého ultrazvukového impulsu a zároveň se tak spouští časovač. Jakmile dojde k průchodu impulsu skrze materiál ke druhé sondě, která signál přijme, tak se časovač zastaví. Výsledný čas průchodu vlny materiálem, který je uveden v mikrosekundách (μs), se zobrazí na displeji měřicího zařízení. Veškeré naměřené hodnoty byly zaznamenány a dále pak použity při výpočtu dynamického modulu pružnosti.



Obrázek 21 - Měřicí přístroj FAKOPP Ultrasonic Timer (autor)

Pro výpočet dynamického modulu pružnosti byl použit vzorec, který byl odvozen z rovnice pro šíření zvuku:

$$c = \lambda \cdot f \quad [m \cdot s^{-1}]$$

c – rychlost zvukových vln [$m \cdot s^{-1}$],

λ – vlnová délka [m],

f – frekvence [Hz],

(Požgaj et al., 1993).

Vzorec pro výpočet dynamického modulu, který je dán následujícím vztahem:

$$E = c^2 \cdot \rho \quad [\text{Pa}]$$

c – rychlost zvuku [$m \cdot s^{-1}$],

ρ – hustota dřeva [$kg \cdot m^{-3}$],

(Požgaj et al., 1993).

4.7.2. Pevnost v ohybu

Další zkouškou prováděnou během výzkumu bylo měření pevnosti v ohybu při statickém zatížení. Pro tyto zkoušky bylo použito zkušební zařízení TIRA 2850 S od firmy Tempos (obrázek č. 22), která je v České republice distribučním zástupcem zařízení této značky. Tento přístroj disponuje softwarem TIRA-test, ve kterém softwaru je možné nastavit potřebné parametry pro danou zkoušku. Mezi tyto volitelné parametry patří: rozměry zkušebních těles, rychlost zatěžování těles, časový úsek zatěžování, hraniční hodnoty zatížení a další. Správné nastavení všech těchto parametrů je potřeba ke správnému průběhu zkoušek, a proto je nutné během provádění zkoušek brát na tyto věci ohled.



Obrázek 22 - Zkušební zařízení TIRA 2850 S (autor)

Samotná zkouška spočívá v působení síly kolmo na vlákna zkušební vzorku (během výzkumu síla působila v radiálním směru, tedy kolmo na tangenciální plochu). Zkušební vzorek byl vždy uložen na dvou podpěrách určitého průměru a vzájemné vzdálenosti jejich středů od sebe. Tyto rozměry a vzdálenost byly nastaveny dle normy ČSN 49 0115. Na vzorek umístěný na podpěrách byla během zkoušek přenášena pomocí zatěžovací hlavy síla, a to konstantní rychlostí. Tato síla byla orientována do bodu pomyslného středu mezi podpěrami (středu délky zkušební vzorku). Rychlost posuvu působící síly byla nastavena tak, aby docházelo k porušení vzorku v čase ideálně 90 s od zahájení zkoušky. Po porušení zkušební vzorku došlo k odtižení a vrácení zatěžovací hlavy do nulové polohy. Naměřené hodnoty během zkoušky byly zaznamenány do softwaru a následně zpracovány a vyhodnoceny. Z těchto dat byly zřejmé maximální hodnoty působící síly, než došlo k porušení tělesa, velikost průhybu a další hodnoty potřebné pro následné výpočty. Následoval samotný výpočet pevnosti v ohybu dle základního vzorce:

$$\sigma_{max} = (3 \cdot F \cdot l_0) / (2 \cdot b \cdot h^2) \quad [\text{MPa}]$$

F – síla zatížení [N],

l_0 – Vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

b – šířka zkušební tělesa [mm],

h – výška zkušební tělesa [mm],

(ČSN 49 0115).

Díky datům naměřeným během zkoušky bylo možné stanovit statický modul pružnosti. Pro výpočet těchto hodnot byl použit tento vzorec:

$$E_w = (l^3 \cdot \Delta F) / (4 \cdot b \cdot h^3 \Delta f) \quad [\text{MPa}]$$

l – vzdálenost mezi středy podpěr [mm],

b – šířka tělesa [mm],

h – výška tělesa [mm],

ΔF – rozdíl mezi silami ($F_2 - F_1$) [N],

Δf – rozdíl průhybu ($a_2 - a_1$) [mm],

(ČSN EN 310).

4.7.3. Rázová houževnatost

Další zkouškou během výzkumu bylo zjišťování rázové houževnatosti zkušebních těles. Během těchto zkoušek bylo postupováno dle normy ČSN 49 0117. Obsahem této normy je základní postup, na jehož základě byly uskutečněny přerážecí práce. Zařízením použitým při této zkoušce bylo Charpyho přerážecí kladivo (obrázek č. 23). Po vyjmutí těles z klimatizační komory byly elektrickým posuvným měřítkem změřeny rozměry každého tělesa, a to s přesností na 0,01 mm. Tyto rozměry byly potřeba pro následný přepočet. Princip této zkoušky spočívá v uložení vždy jednoho vzorku na podpěry tak, aby bylo působeno na předem určenou plochu (tangenciální plocha) a síla působila přibližně ve středu délky vzorku. Po usazení vzorku na podpěry byla hlavice kladiva zdvižena do počáteční (horní) polohy a následně odjištěna. Následovalo přeražení zkušebního vzorku. Po zastavení pohybu kladiva byla ze stupnice odečtena Práce [J], která byla během přerážení pohlcena. Tato hodnota byla následně přepočtena na plochu tělesa, na kterou byla spotřebována. Pro tento přepočet byl použit vzorec:

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

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J],

b, h – rozměry tělesa [cm],

(ČSN 49 0117).

Již po provedení zkoušky bylo možné vizuálně posoudit houževnatost daných tělísek. Pouhým okem bylo možné v místě porušení rozeznat, zda se jedná o vzorek houževnatý (členitý zlom s dlouhými třískami), či křehký (málo členitý a hladký zlom). Také bylo možné pozorovat rozdíl mezi vzorkem s velkou hustotou letokruhů a vzorkem s malou hustotou letokruhů.

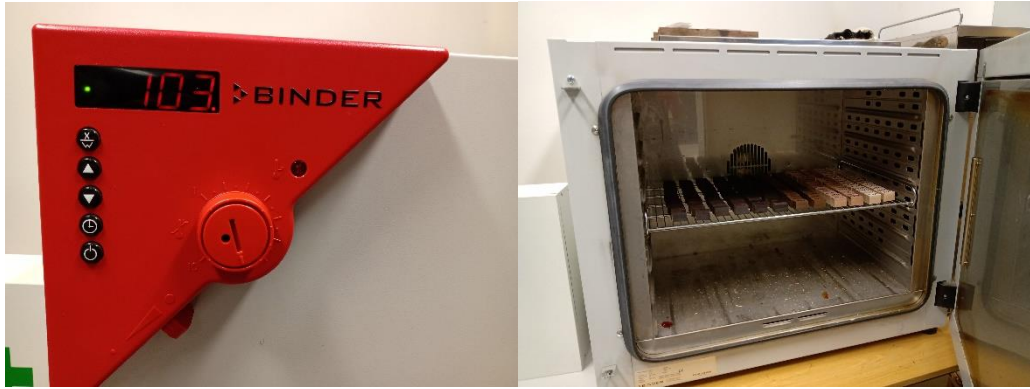


Obrázek 23 - Charpyho přerážecí kladivo (autor)

4.7.4. Zkouška bobtnání

Před zahájením samotné zkoušky bylo nutné vyrobit tělesa, u kterých bylo následně zkoumáno bobtnání. Tato tělesa byla zhotovena uříznutím z neporušené části těles dříve použitých při přerážecích zkouškách. Při této části měření bylo postupováno dle normy ČSN 49 0126.

Požadovaný rozměr těles byl tedy stanoven na 20x20x30 mm. Většina těchto těles však byla vlivem předchozích modifikací zdeformována, proto bylo potřeba na všechna tělesa narýsovat rysky. Pomocí těchto rysek bylo možné provádět měření rozměrů v absolutně suchém stavu a následně po vyjmutí z nádoby s vodou vždy ve stejném místě. Takto připravená tělesa byla vyskládána do horkovzdušné sušárny Binder (obrázek č. 24).



Obrázek 24 - Horkovzdušná sušárna Binder (autor)

V sušárně byla nastavena teplota 103 °C. Namátkově bylo vybráno několik vzorků, které byly v průběhu sušení kontrolně váženy. V momentě, kdy se hmotnost vážených vzorků neměnila, bylo možné všechny vzorky ze sušárny vyjmout a následně u nich změřit rozměry a hmotnost. Pro tato měření bylo použito digitálního posuvného měřítka a laboratorní váhy uvedených výše.

Následovalo rozložení zkušebních tělísek do nádoby, jejich zatížení a zalití destilovanou vodou. Opět bylo vybráno několik těles, u kterých bylo namátkově prováděno vážení. Když hmotnost vážených vzorků při opětovném vážení nestoupala, došlo k jejich vyjmutí a následnému měření rozměrů a vážení.

Naměřená data byla zapsána a následoval výpočet objemového bobtnání, který probíhal dle vzorce:

$$\alpha_{V,max} = \frac{(l_{r,max} \cdot l_{t,max} \cdot l_{a,max}) - (l_{r,min} \cdot l_{t,min} \cdot l_{a,min})}{l_{r,min} \cdot l_{t,min} \cdot l_{a,min}} \cdot 100$$

V_{max} = objem nabobtnalého vzorku [mm³],

V_{min} = objem suchého vzorku [mm³],

(ČSN 49 0126).

Dále bylo také počítáno bobtnání v jednotlivých směrech, a to podle vzorce:

$$\alpha_{r,max} = \frac{l_{r,max} - l_{r,min}}{l_{r,min}} \cdot 100, \alpha_{t,max} = \frac{l_{t,max} - l_{t,min}}{l_{t,min}} \cdot 100, \alpha_{a,max} = \frac{l_{a,max} - l_{a,min}}{l_{a,min}} \cdot 100$$

$l_{r,max}$, $l_{t,max}$, $l_{a,max}$ – jsou rozměry zkušebního vzorku ve směru radiálním, tangenciálním a axiálním po máčení [mm],

$l_{r,min}$, $l_{t,min}$, $l_{a,min}$ – jsou rozměry zkušebního vzorku ve směru radiálním, tangenciálním a axiálním po vysušení [mm],

(ČSN 49 0126).

4.8. Vyhodnocení dat

Všechna naměřená data a výsledky byly během výzkumu shromažďovány a zpracovávány v tabelárním programu MS Excel 2016 (Microsoft Corporation, USA). Pro vyhodnocování a tvorbu grafů byl použit program STATISTICA 13 (statsoft INC., USA). Z naměřených dat byla v tomto programu použita jednofaktorová a vícefaktorová analýza ANOVA. Graficky byly znázorněny jednotlivé zkoumané vlastnosti v závislosti na druhu provedené modifikace a druhu zkoušek. Vypracované grafy byly doplněny informacemi týkajícími se dané zkoušky, měřenými jednotkami a popisem výsledků. Během jednotlivých statistických analýz byla použita hladina významnosti $\alpha = 0,05$ %.

Tabulka 6 - Statistická významnost faktoru (autor)

Hodnota P	Statistická významnost faktoru
$\emptyset P < 0,05$	vliv faktoru je statisticky významný
$\emptyset P > 0,05$	vliv faktoru není statisticky významný
$\emptyset P = 0,05$	vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti
$\emptyset P = 0$	faktor působí
$\emptyset P < 0,001$	vliv faktoru je statisticky velmi významný
$\emptyset 0,001 < P < 0,01$	vliv faktoru je statisticky středně významný
$\emptyset 0,01 < P < 0,05$	vliv faktoru je statisticky málo významný

5. Výsledky a diskuze

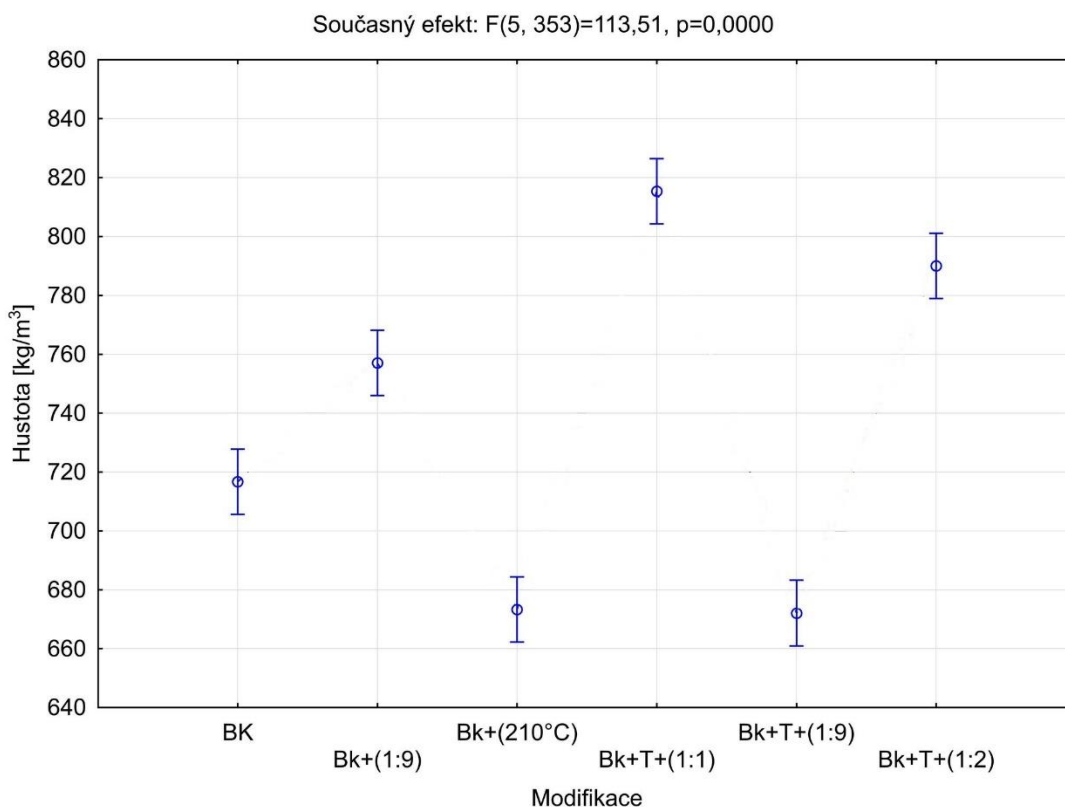
Obsahem této části je shrnutí výsledků, které jsou zde prezentovány v tabelární, grafické a slovní podobě. Jak již bylo uvedeno v kapitole 4.1, bylo ke zpracování naměřených dat použito softwarových programů. Některé vyhodnocené výsledky jsou porovnány s dostupnými údaji v literatuře zabývající se touto problematikou.

5.1. Hustota

V grafu č. 1 je znázorněna změna hodnot hustoty během jednotlivých druhů modifikací bukového dřeva. Dále jsou v tabulce č. 7 uvedeny základní statistické údaje týkající se změn hustoty. Střední hodnota hustoty referenčních vzorků byla 716 [kg/m³], což odpovídá hodnotám, které uvádí například (Tsoumis, 1991) nebo (Wagenfür, 2000). Nejvyšší střední hodnoty hustoty bylo dosaženo u vzorků, které byly impregnovány pryskyřicí v poměru 1:1 a následně termicky upraveny (BK+T+1:1). Tato nejvyšší dosažená hodnota činila 815 [kg/m³]. Naopak nejnižších hodnot dosahovala hustota vzorků, které byly impregnovány pryskyřicí v poměru 1:9 a následně termicky upraveny (BK+T+1:9). Střední hodnota hustoty u těchto vzorků byla 660 [kg/m³]. Je také možné vidět, že hustota vzorků pouze impregnovaných v poměru 1:9 byla oproti referenčním vzorkům vyšší, ale kombinací impregnování koncentrací 1:9 a následnou termickou úpravou byla hodnota hustoty ještě nižší než hodnoty hustoty vzorků, které byly pouze termicky upravené. Tento fakt odpovídá teoretickým předpokladům, jelikož byly dané vzorky impregnovány malou koncentrací pryskyřice.

Tabulka 7 - Statistická data - hustota (autor)

hustota vzorků po modifikacích a následném klimatizování [kg/m ³]						
druh modifikace vzorku	počet vzorků	průměrná hodnota	minimální hodnota	maximální hodnota	směrodatná odchylka	variační koeficient [%]
BK	60	716,7	661,1	797,7	29,6	4,13
BK+1:9	60	757,1	692,1	819,3	26,7	3,53
BK+210 °C	60	673,3	606,7	742,8	33,6	4,99
BK+T+1:1	60	815,3	634,7	906,61	67,1	8,23
BK+T+1:9	60	660,8	602,8	762,1	41,2	6,23
BK+T+1:2	60	789,9	703	890,5	49,6	6,28



Graf 1 - Hustota (autor)

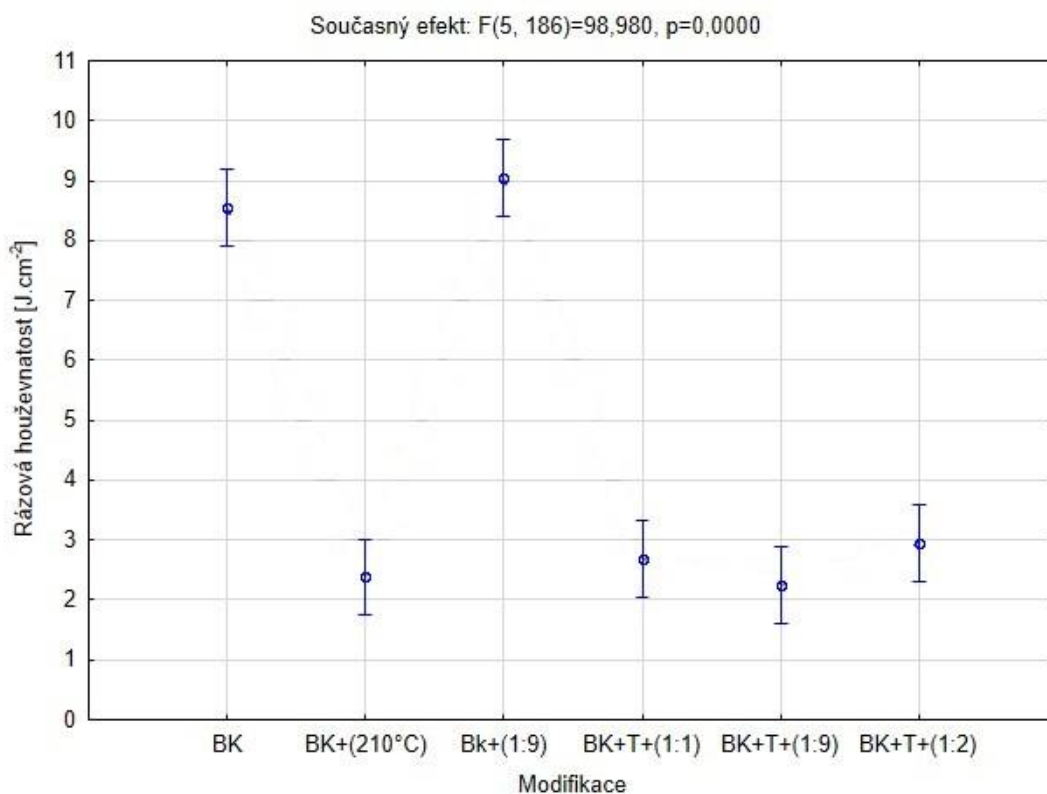
V tabulce č. 8 je znázorněn nárůst a pokles hustoty jednotlivých skupin vzorků. Tyto rozdíly jsou vztahovány k hustotě referenčních vzorků. Všechny tyto hodnoty byly měřeny a vypočítány u vzorků v absolutně suchém stavu. Je možné pozorovat pokles hustoty u vzorků, které byly pouze termicky upravené a vzorků impregnovaných nízkou koncentrací pryskyřice a následně termicky upravených. Jelikož byly tyto vzorky impregnovány malou koncentrací pryskyřice, převládá zde vliv termické úpravy, což potvrdilo teoretické předpoklady. U vzorků pouze impregnovaných (BK+1:9) a vzorků s kombinovanou úpravou (BK+T+1:1) a (BK+T+1:2) došlo k nárůstu hodnot hustoty. U těchto dvou kombinovaných skupin je nárůst možné přisuzovat vyšším koncentracím pryskyřice, kterou byly vzorky impregnovány.

Tabulka 8 – Změna hustoty (autor)

druh modifikace vzorku	BK	BK+1:9	BK+210 °C	BK+T+1:1	BK+T+1:9	BK+T+1:2
hustota [kg/m³]	692,31	719,04	674,57	772,82	659,48	761,3
procentuální změna hustoty	100%	103,86%	97,30%	111,63%	95,25%	109,90%

5.2. Rázová houževnatost

V grafu č. 2 je znázorněno, jak se změnila rázová houževnatost u vzorků modifikovaných oproti vzorkům referenčním. Při zkouškách byly vzorky rázově zatěžovány v radiálním směru a zatěžovací síla tak působila na tangenciální plochu. Z grafu vyplývá, že k nepatrnému zvýšení střední hodnoty rázové houževnatosti došlo u vzorků, které byly pouze impregnovány pryskyřicí v poměru 1:9 (BK+1:9). U všech ostatních skupin vzorků došlo ke značnému snížení rázové houževnatosti oproti vzorkům referenčním. Z grafu je také zřejmé, že vzorky, které byly impregnovány jakoukoliv ze zkoumaných koncentrací a následně termicky upraveny, nedosáhly výrazného zlepšení hodnot rázové houževnatosti vůči vzorkům pouze termicky upraveným. Jak již bylo zmíněno, tak nejvyšší střední hodnoty rázové houževnatosti bylo dosaženo u vzorků, které byly pouze impregnovány pryskyřicí v poměru 1:9 bez následné termické úpravy (BK+1:9). Tato hodnota byla $9 \text{ [J/cm}^2\text{]}$. Nejnižší střední hodnotu $2,2 \text{ [J/cm}^2\text{]}$ měly vzorky impregnované pryskyřicí koncentrací 1:9 a následně termicky upravené (BK+T+1:9). Tato hodnota je velmi blízká rázové houževnatosti vzorků pouze termicky modifikovaných $2,3 \text{ [J/cm}^2\text{]}$. Tyto a další základní statistické údaje týkající se rázové houževnatosti jsou uvedeny v tabulce č. 9, kde jsou také vidět značné rozdíly v maximálních a minimálních hodnotách rázové houževnatosti v samotných skupinách vzorků dané modifikace. Tyto výkyvy můžeme přisuzovat rozdílům hustoty a také průběhu letokruhů v daných vzorcích. Takovéto rozdíly bylo možné dobře pozorovat již při samotných zkouškách rázové houževnatosti, kde byly rozdíly mezi charakterem lomu vzorků o větší hustotě a vzorků menší hustoty viditelné pouhým okem. Množství pryskyřice, kterou byly všechny skupiny impregnovány, nemělo vliv na rázovou houževnatost, protože výsledky ukazují, že skupiny vzorků o různých koncentracích vykazovaly hodnoty rázové houževnatosti velmi blízké hodnotám vzorků pouze termicky upravených. Nepotvrdilo se tedy očekávané zlepšení rázové houževnatosti u vzorků s kombinací úprav oproti pouze termicky upravenému dřevu.



Graf 2 - Rázová houževnatost (autor)

Tabulka 9 - Statistická data - rázová houževnatost (autor)

rázová houževnatost - radiální směr [J/cm ²]						
druh modifikace vzorku	počet vzorků	průměrná hodnota	minimální hodnota	maximální hodnota	směrodatná odchylka	variační koeficient [%]
BK	30	8,5	5,2	12	1,8	21,18
BK+1:9	30	9	5,8	12	1,9	21,11
BK+210 °C	30	2,3	0,4	6,5	1,7	73,91
BK+T+1:1	30	2,6	0,6	7,6	1,7	65,38
BK+T+1:9	30	2,2	0,5	6	1,5	68,18
BK+T+1:2	30	2,9	1	9,5	2,1	72,41

V tabulce č. 10 jsou výsledky Duncanova testu. Červeně jsou vyznačeny statisticky významné hodnoty. V případě rázové houževnatosti byl nejvíce statisticky významný rozdíl mezi vzorky referenčními (BK) a vzorky impregnovanými pryskyřicí koncentrací 1:2 a následně termicky upravenými (BK+T+1:2). Naopak u skupin vzorků (BK+210 °C), (BK+T+1:1), (BK+T+1:9) a (BK+T+1:2) byl statistický rozdíl velmi málo významný, což vyplývá i z grafu č. 2.

Tabulka 10 - Duncanův test - rázová houževnatost (autor)

Duncanův test; proměnná Rázová houževnatost [J.cm-2]						
	BK	BK+(210 °C)	BK+(1:9)	BK+T+(1:1)	BK+T+(1:9)	BK+T+(1:2)
BK		0,000003	0,274652	0,000011	0,000004	0,000009
BK+(210 °C)	0,000003		0,000004	0,50225	0,754499	0,250058
BK+(1:9)	0,274652	0,000004		0,000003	0,000004	0,000011
BK+T+(1:1)	0,000011	0,50225	0,000003		0,357503	0,578677
BK+T+(1:9)	0,000004	0,754499	0,000004	0,357503		0,163213
BK+T+(1:2)	0,000009	0,250058	0,000011	0,578677	0,163213	

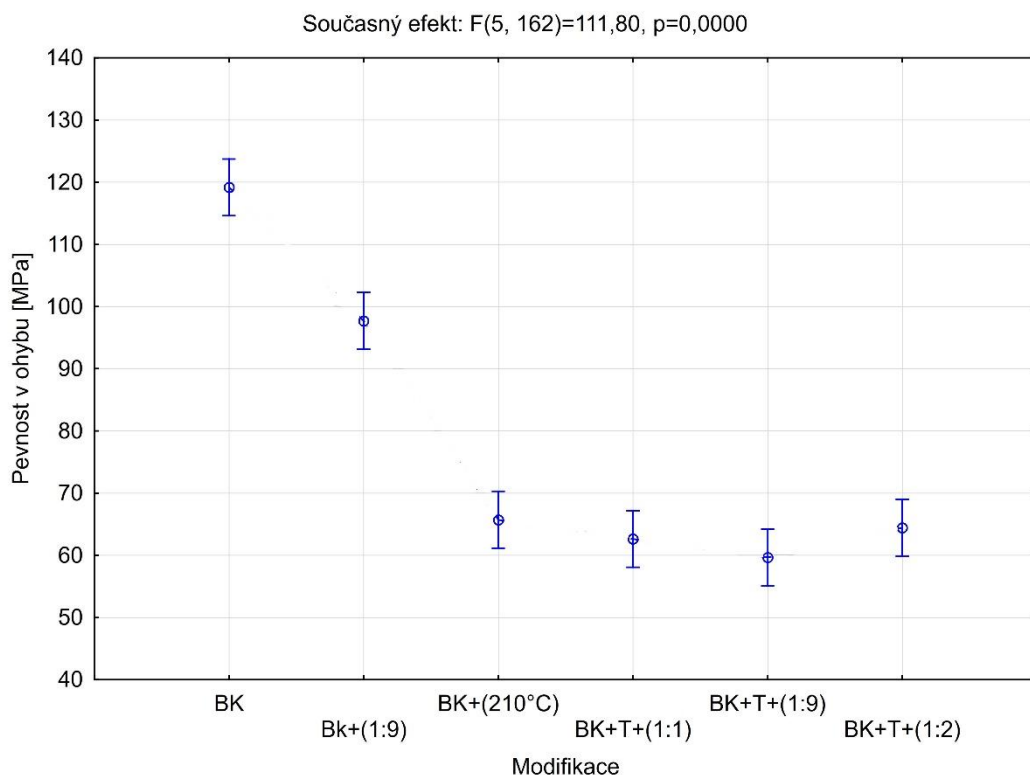
V tabulce č. 11 jsou uvedeny hodnoty, které určují závislost rázové houževnatosti na hustotě dřeva. U referenčních vzorků (BK) byla dle naměřených dat stanovena velká závislost mezi rázovou houževnatostí a hustotou dřeva, tím pádem při nárůstu hustoty dřeva roste i jeho rázová houževnatost. U vzorků impregnovaných pryskyřicí koncentrací 1:9 bez následné termické úpravy (BK+1:9) byla zjištěna jen velmi malá závislost mezi rázovou houževnatostí a hustotou dřeva. U skupiny (BK+T+1:1) byl vztah mezi hustotou a rázovou houževnatostí středně významný. U ostatních skupin modifikací byla tato významnost středně malá až malá, a to v záporných hodnotách.

Tabulka 11 - Závislost rázové houževnatosti na hustotě (autor)

závislost rázové houževnatosti na hustotě			
druh modifikace	počet vzorků	směr zatížení	korelační koeficient
BK	30	radiální	0,625
BK+1:9	30	radiální	0,181
BK+210 °C	30	radiální	-0,306
BK+T+1:1	30	radiální	0,374
BK+T+1:9	30	radiální	-0,405
BK+T+1:2	30	radiální	-0,227

5.3. Statická pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu jednotlivých variant vzorků je znázorněna v grafu č. 3., z něhož je patrné, že pevnost v ohybu se u všech skupin zkušebních vzorků, které byly impregnovány a následně termicky upraveny, oproti pouze termicky upraveným vzorkům (BK+210 °C) nezvýšila, a naopak ještě klesla. Nebyl tak potvrzen vliv impregnování různými koncentracemi pryskyřice na zvýšení pevnosti v ohybu vůči pouze termicky upravenému dřevu. Vyšších středních hodnot pevnosti v ohybu vůči vzorkům, které byly pouze termicky upravené (BK+210 °C), bylo dosaženo u skupiny referenčních vzorků (BK) a vzorků pouze impregnovaných bez následné termické úpravy (BK+1:9). Dle teoretických předpokladů by měly vzorky skupiny (BK+1:9) vlivem zvýšené hustoty dosahovat vyšších hodnot pevnosti v ohybu než vzorky referenční (BK), což se však během zkoušek nepotvrdilo. Číselné hodnoty jednotlivých skupin vzorků a další statisticky vyhodnocená data jsou k nahlédnutí v tabulce č. 12.



Graf 3 - Statická pevnost v ohybu (autor)

Z tabulky č. 12 je možné vzájemně porovnat hodnoty jednotlivých skupin zkušebních vzorků. Ze středních hodnot pevnosti v ohybu můžeme dojít k závěru, že vzorky (BK+T+1:2) měly srovnatelnou pevnost v ohybu jako vzorky pouze termicky upravené (BK+210 °C). Skupiny vzorků (BK+T+1:9) a (BK+T+1:1) měly střední hodnotu pevnosti v ohybu ještě nižší než vzorky pouze termicky upravené (BK+210 °C), z čehož vyplývá, že impregnací a následnou termickou úpravou vzorků nedošlo ke zlepšení pevnosti v ohybu. Ke zlepšení hodnot pevnosti ohybu v porovnání s (BK+210 °C) došlo u vzorků (BK+1:9). Rozdíl průměrných hodnot pevnosti v ohybu činil mezi těmito skupinami vzorků téměř 32 MPa, což je statisticky významný rozdíl. Referenční vzorky (BK) dosáhly oproti vzorkům (BK+1:9) větší pevnosti o 21,5 MPa a oproti vzorkům (BK+210 °C) o 53,4 MPa vyšších hodnot pevnosti v ohybu.

Tabulka 12 - Statistická data - statická pevnost v ohybu (autor)

statická pevnost v ohybu - radiální směr [MPa]						
druh modifikace vzorku	počet vzorků	průměrná hodnota	minimální hodnota	maximální hodnota	směrodatná odchylka	variační koeficient [%]
BK	30	119,1	86	147,8	11,7	9,82
BK+1:9	30	97,6	70,5	124	13,1	13,42
BK+210 °C	30	65,7	42,7	86,8	9,1	13,85
BK+T+1:1	30	62,6	43,5	92,1	12,1	19,33
BK+T+1:9	30	59,6	38,9	98,9	13,1	21,98
BK+T+1:2	30	64,4	45,9	92,7	13,5	20,96

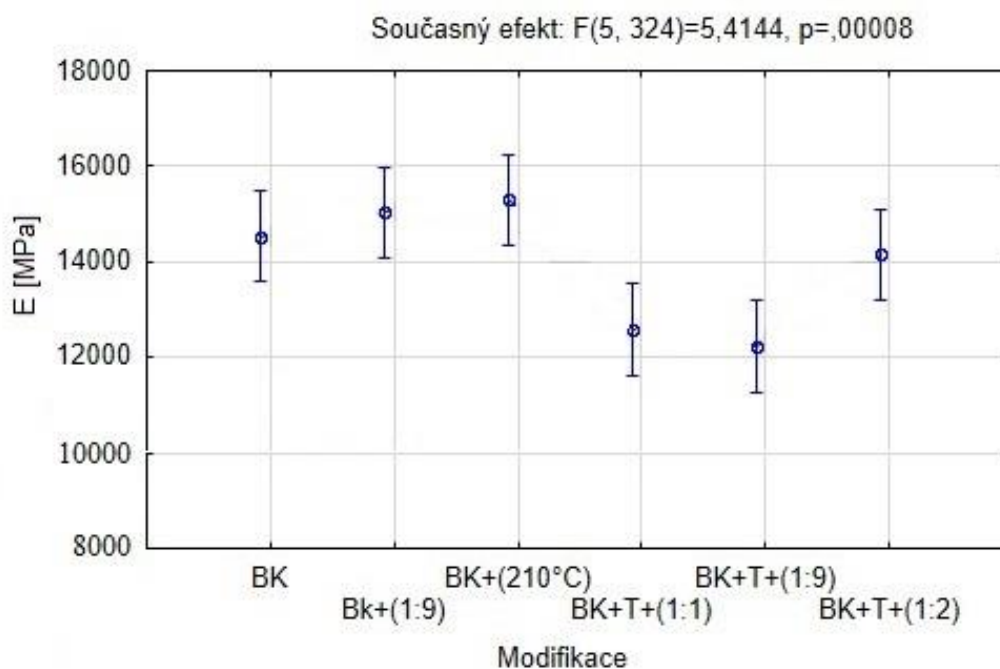
V tabulce č. 13 je posuzován vztah mezi pevností v ohybu a hustotou jednotlivých skupin vzorků. Dle velikosti korelačního koeficientu byla zjištěna středně velká záporná závislost pevnosti v ohybu na hustotě, a to u dvou skupin zkušebních vzorků (BK+T+1:9) a (BK+T+1:1). Ostatní skupiny nevykazovaly významnou závislost těchto dvou měřených parametrů.

Tabulka 13 - Závislost statické pevnosti v ohybu na hustotě (autor)

závislost statické pevnosti v ohybu na hustotě			
druh modifikace	počet vzorků	směr zatížení	korelační koeficient
BK	30	radiální	-0,116
BK+1:9	30	radiální	-0,257
BK+210°C	30	radiální	-0,141
BK+T+1:1	30	radiální	-0,435
BK+T+1:9	30	radiální	-0,520
BK+T+1:2	30	radiální	-0,182

5.4. Dynamický modul pružnosti

Porovnání středních hodnot dynamického modulu pružnosti jednotlivých skupin vzorků je vyobrazeno v grafu č. 4. Jak již bylo zmíněno v kapitole č. 4, dochází u termicky upraveného dřeva ke zvýšení dynamického modulu pružnosti, což můžeme vidět i v tomto grafu. V porovnání s referenčními vzorky došlo ke zvýšení dynamického modulu pružnosti i u skupiny vzorků, které byly pouze impregnovány pryskyřicí (BK+1:9). U skupin vzorků, které byly impregnovány a následně termicky upraveny (BK+T+1:1), (BK+T+1:9) a (BK+T+1:2) byl dynamický modul pružnosti nižší vlivem kombinace úprav oproti referenčním vzorkům (BK), vzorkům upraveným pouze impregnací (BK+1:9) a vzorkům pouze termicky upraveným (BK+210 °C). U skupiny vzorků (BK+T+1:2) došlo sice oproti referenčním vzorkům ke snížení hodnot dynamického modulu pružnosti, ale nejednalo se o výrazný rozdíl. Zároveň ze všech skupin vzorků, kde byla provedena kombinace impregnace a následné termické úpravy, byl u skupiny vzorků (BK+T+1:2) dynamický modul pružnosti nejvyšší. Z grafu je tedy patrné, že ke zlepšení hodnot dynamického modulu pružnosti vůči referenčním vzorkům došlo pouze u skupin vzorků, které byly modifikovány pouze jednou úpravou nikoliv kombinací metod.



Graf 4 - Dynamický modul pružnosti (autor)

V tabulce č. 14 jsou k nahlédnutí statisticky zpracované číselné hodnoty dynamického modulu pružnosti jednotlivých skupin zkušebních vzorků.

Tabulka 14 - Statistická data - dynamický modul pružnosti (autor)

dynamický modul pružnosti [MPa]						
druh modifikace vzorku	počet vzorků	průměrná hodnota	minimální hodnota	maximální hodnota	směrodatná odchylka	variační koeficient [%]
BK	30	14529,5	9283,2	19841,9	2497,7	17,19
BK+1:9	30	15023,4	10442,3	27180,4	4311,4	28,70
BK+210 °C	30	15301,2	10017,5	30014,4	3618	23,65
BK+T+1:1	30	12565	7093	20816	3195	25,43
BK+T+1:9	30	12663,8	8174,4	17903,2	2795,2	22,07
BK+T+1:2	30	14140,9	8211,3	18711,1	2695	19,06

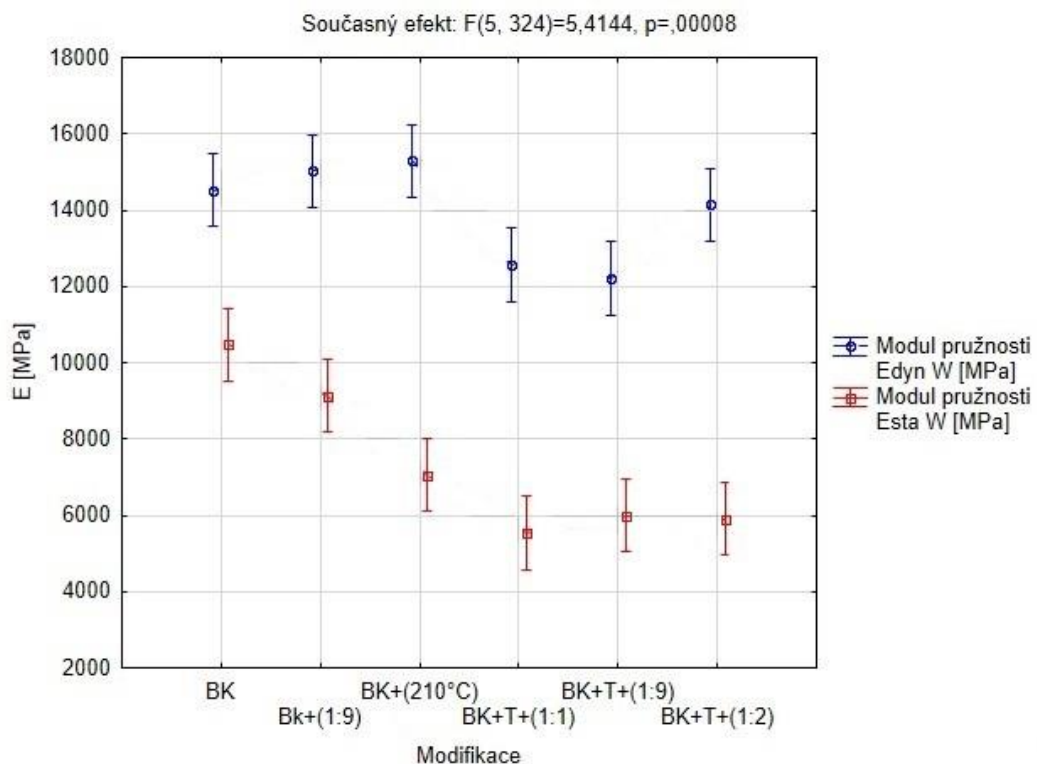
Tabulka č. 15 se týká posouzení závislosti dynamického modulu pružnosti na hustotě dřeva. Díky hodnotám korelačních koeficientů v tabulce je možné stanovit, že mezi dynamickým modulem pružnosti a hustotou dřeva vzorků (BK+T+1:9) je statisticky významná závislost. U dalších skupin vzorků nebyla statisticky významná závislost potvrzena.

Tabulka 15 - Závislost dynamického modulu pružnosti na hustotě (autor)

závislost dynamického modulu pružnosti na hustotě		
druh modifikace	počet vzorků	korelační koeficient
BK	30	0,038
BK+1:9	30	-0,007
BK+210 °C	30	0,097
BK+T+1:1	30	-0,144
BK+T+1:9	30	0,715
BK+T+1:2	30	-0,030

5.5. Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti

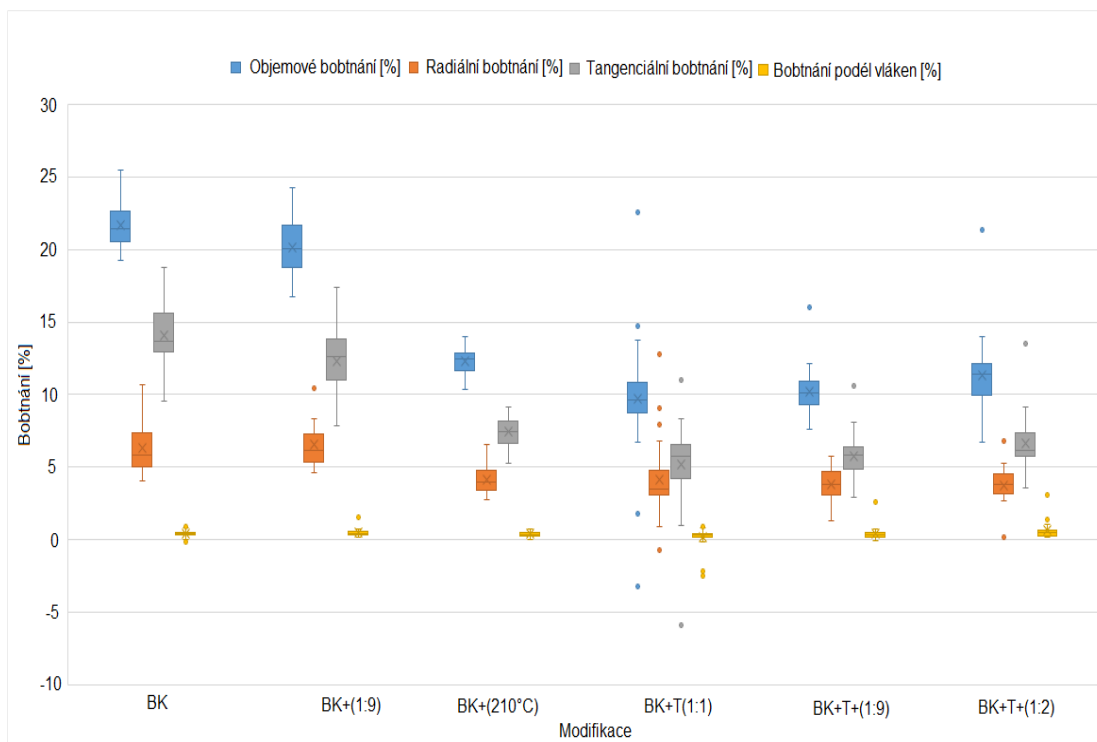
V grafu č. 5, který prezentuje rozdíl mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti zkušebních vzorků je zřejmý rozdíl středních hodnot dynamického modulu pružnosti (modrá barva) oproti statickému modulu pružnosti (červená barva). Rozdílný je i průběh křivek porovnávajících hodnoty jednotlivých skupin statického a dynamického modulu pružnosti. Zatímco u dynamického modulu pružnosti došlo u skupin (BK+1:9) a (BK+210 °C) v porovnání s referenčními vzorky k nárůstu hodnot dynamického modulu pružnosti, u statického modulu pružnosti dosahovaly všechny skupiny modifikovaných vzorků hodnot nižších než referenční vzorky. Jak je patrné z grafu, tak kombinace modifikací vykazovala jako u dynamického modulu pružnosti hodnoty nižší než skupiny vzorků, které byly upraveny pouze jednou modifikací. Hodnoty statického modulu pružnosti byly u skupiny vzorků (BK+1:9) oproti (BK+210 °C) vyšší v porovnání rozdílů stejných skupin vzorků v případě dynamického modulu pružnosti. Výsledky Duncanova testu potvrdily u skupiny (BK+T+1:9) a (BK+T+1:2) dynamického modulu pružnosti statisticky významný rozdíl hodnot. U statického modulu pružnosti není rozdíl hodnot těchto skupin statisticky významný. Tyto rozdíly jsou patrné i z grafu níže.



Graf 5 - Porovnání statického a dynamického modulu pružnosti (autor)

5.6. Bobtnání

Graf č. 6 popisuje výsledky objemového, radiálního, tangenciálního a podélného bobtnání jednotlivých skupin vzorků. U výsledků objemového bobtnání mezi referenčními vzorky (BK) a vzorky pouze impregnovanými pryskyřicí (BK+1:9) je rozdíl středních hodnot bobtnání oproti suchému stavu 1,6 %. Větší procentuální rozdíly objemového bobtnání až 12 % jsou zejména mezi referenčními vzorky (BK) a skupinami vzorků, které byly impregnovány a následně termicky upraveny. Průměrné hodnoty objemového bobtnání skupiny vzorků (BK+T+1:1) byly oproti skupině pouze termicky upravených vzorků (BK+210 °C) o 2,2 % nižší, což dokazuje, že kombinací impregnování pryskyřicí a následné termické úpravy bylo dosaženo menšího objemového bobtnání. Ke snížení objemového bobtnání došlo i u dvou dalších skupin vzorků, u kterých byla provedena impregnace a následná termická úprava. Tento rozdíl byl však spíše nepatrný. Průběh křivky radiálního bobtnání skrze všechny druhy modifikací vzorků je obdobný jako u objemového bobtnání. Největší rozdíl středních hodnot je opět mezi skupinou referenčních vzorků (BK) a vzorků (BK+T+1:1), a to 8,5 %. Rozdíly průměrných hodnot pouze termicky modifikovaných vzorků (BK+210 °C) a vzorků s kombinovanou modifikací se pohybuje od 1,9 % (BK+T+1:1) do 0,8 % (BK+T+1:2).



Graf 6 - Bobtnání (autor)

U bobtnání radiálního byly rozdíly středních hodnot jednotlivých skupin vzorků výrazně nižší. Nejvyšší průměrné hodnoty radiálního bobtnání bylo dosaženo u skupiny vzorků pouze impregnovaných (BK+1:9). Rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší střední hodnotou jednotlivých skupin vzorků radiálního bobtnání činil 2,8 %. Rozdíly hodnot u skupin (BK+210 °C), (BK+T+1:1), (BK+T+1:9) a (BK+T+1:2) byly v rozmezí 0,4 % a 0,2 %. Rozdíly hodnot bobtnání v podélném směru byly téměř nezatelné. Dle teoretických předpokladů se ukázalo, že koncentrace pryskyřice, kterou byly vzorky impregnovány, má pouze zanedbatelný vliv na bobtnání.

6. Závěr

Hlavním cílem této práce bylo posouzení vlivu termické modifikace bukového dřeva impregnovaného pryskyřicí na fyzikální a mechanické vlastnosti takto modifikovaného dřeva. Jelikož se vlivem termické úpravy mění stavba dřeva a dochází tak ke zhoršení mechanických vlastností, byla vyzkoušena kombinace termické úpravy s impregnací tohoto dřeva. Tato kombinace metod měla po provedení výzkumu dokázat, zda se mechanické a fyzikální vlastnosti takto upraveného dřeva zlepší a bude tak možné využívat tohoto dřeva například pro nosné konstrukce.

Z provedených zkoušek během výzkumu vyplynulo, že použitím kombinace impregnování a následné termické úpravy došlo u rázové houževnatosti takto upraveného dřeva k dosažení hodnot velmi blízkých pouze termicky upravenému dřevu a kombinace metod tak nepomohla ke značnému zvýšení rázové houževnatosti. Mezi skupinami vzorků s kombinovanou úpravou byly však rozdíly hodnot rázové houževnatosti. Skupiny s koncentracemi pryskyřice 1:2 a 1:1 dosáhly hodnot vyšších než skupina s koncentrací 1:9. Ke zvýšení rázové houževnatosti tak došlo pouze u vzorků, které byly impregnované pryskyřicí bez následné termické úpravy. Z posuzování vlivu hustoty dřeva na rázovou houževnatost se ukázalo, že statisticky významný vliv má hustota na rázovou houževnatost u vzorků referenčních a vzorků impregnovaných pryskyřicí v poměru 1:9 následně termicky upravených.

U statické pevnosti v ohybu bylo dosaženo podobných výsledků a kombinací impregnace s následnou termickou modifikací tak nebylo dosaženo zvýšení hodnot statické pevnosti v ohybu. Hodnoty statické pevnosti v ohybu u skupiny vzorků s aplikovanou největší koncentrací pryskyřice a následnou termickou úpravou byly téměř shodné s hodnotami dřeva pouze termicky upraveného. Ostatní varianty dosáhly hodnot nižších. Vyšších hodnot statické pevnosti v ohybu oproti pouze termicky upraveným vzorkům bylo dosaženo u skupiny vzorků, které byly pouze impregnovány pryskyřicí. Nejvyšší hodnoty statické pevnosti v ohybu byly naměřeny u vzorků referenčních. Při zkoumání vlivu hustoty na statickou pevnost v ohybu byla zjištěna záporná středně velká závislost statické pevnosti v ohybu na hustotě dřeva u skupin vzorků impregnovaných pryskyřicí v poměru 1:1 a 1:9, které byly následně termicky upraveny.

Z dat získaných během výzkumu byly vypočteny a následně porovnány statický a dynamický modul pružnosti. U dynamického modulu pružnosti došlo u skupin vzorků pouze impregnovaných a pouze termicky upravených k nárůstu hodnot vůči vzorkům referenčním. Skupina vzorků impregnovaných poměrem pryskyřice 1:2 dosáhla hodnot mírně nižších než skupina referenčních vzorků. U zbylých dvou skupin bylo opět dosaženo hodnot nejnižších s tím, že skupina s vyšším podílem aplikované pryskyřice vykazovala hodnoty nepatrně vyšší oproti skupině vzorků s nejmenším podílem impregnované pryskyřice. U statického modulu pružnosti byly zjištěny nejvyšší hodnoty u skupiny vzorků referenčních. Druhé nejvyšší hodnoty statického modulu pružnosti dosáhla skupina vzorků pouze impregnovaných. Vzorky pouze termicky upravené měly vyšší hodnotu statického modulu pružnosti než veškeré skupiny, u kterých byla provedena kombinace metod. Nepatrně vyšších hodnot statického modulu pružnosti vůči zbývajícím skupinám, u kterých byl proveden kombinovaný způsob modifikace, dosahovaly vzorky impregnované nejmenším poměrem pryskyřice.

V rámci bobtnání bylo u všech skupin vzorků kombinovaných způsobů modifikace dosaženo nižších hodnot objemového, radiálního i tangenciálního bobtnání vůči ostatním skupinám vzorků. Bobtnání podél vláken dosahovalo u všech hodnocených skupin zanedbatelných hodnot, a proto nebylo dále posuzováno. Hodnoty všech tří skupin bobtnání byly u skupin, kde byla provedena impregnace a následná termická úprava, nižší než u vzorků pouze termicky upravených. Toto snížení hodnot bobtnání lze považovat za zlepšení. Nejvíce patrné rozdíly mezi skupinami vzorků jsou u objemového bobtnání a menší rozdíly pak u tangenciálního bobtnání. U bobtnání radiálního je rozmezí hodnot jednotlivých skupin vzorků malé.

Tato práce měla za úkol odhalit, zda dojde vlivem kombinace impregnování a termické modifikace ke zlepšení mechanických a fyzikálních vlastností dřeva, což se z větší části nepotvrdilo. Termická úprava dřeva snížila mechanické vlastnosti a impregnace tento pokles nedokázala vykompenzovat. Předpoklad, že se docílí pomocí kombinace impregnování a termické úpravy lepších mechanických vlastností, se nepotvrdil. Výsledky všech zkoumaných mechanických vlastností ukázaly, že takto upravené vzorky nedokázaly zlepšit mechanické vlastnosti vůči vzorkům referenčním, vzorkům pouze impregnovaným nebo vzorkům pouze termicky upraveným. Ke zlepšení vůči referenčním, pouze impregnovaným a pouze termicky upraveným vzorkům však došlo u zkoušek bobtnání, kdy vzorky upravené kombinací metod vykazovaly nižší

objemové, tangenciální a radiální bobtnání. Bylo také prokázáno, že koncentrace pryskyřice, kterou byly vzorky impregnovány, měla pouze zanedbatelný vliv. V celkovém měřítku tak kombinací metod impregnování a termické úpravy dřeva nedošlo k výraznému zlepšení mechanických vlastností. Takto upravené bukové dřevo tedy není doporučeno používat jako konstrukční materiál, který by byl vystavován vlivům povětrnosti. Nabízí se zde možnost aplikování této metody na dřeviny, které mají jinou stavbu dřeva, nebo použití jiných koncentrací pryskyřice k impregnování, které by mohly mít výraznější vliv, či snížení teploty použité během termické úpravy. Tato problematika by měla být určitě do budoucna dále zkoumána a vyvíjena.

7. Použité zdroje

7.1. Literatura

- AAS, GREGOR A ANDREAS RIEDMILLER**, 2002. *Stromy: praktická příručka k určování evropských jehličnatých a listnatých stromů*. 3. české vyd. Praha: Slovart. Kapesní atlas. ISBN 80-7209-420-3.
- AWOUEMI L.** *Heat treatment of less-valuable Nigerian-grown Cebia Pentadara wood for improved properties*. 2006. IRG/WP/06-40332, 7 s.
- BALABÁN, KAREL.** *Nauka o dřevě: část I. - Anatomie dřeva*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 216 s. Lesnická knihovna. Velká řada. Svazek 16.
- BARLOW C. Y.** Materials selection for musical instruments. In: Proceedings of the Institute of Acoustics, 1997. 19, (5), s. 69-78.
- BEKHTA, P. AND NIEMZ, P.** *Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood*. *Holzforschung*, 2003. 57(5), 539–546.
- BENGTSSON, C., JERMER, J. AND BREM, F.** *Bending strength of heat-treated spruce and pine timber*. International Research Group on Wood Preservation, 2002. Doc. No. IRG/WP 02-40242.
- BHUIYAN, M.T.R., HIRAI, N. AND SOBUE, N.** *Changes of crystallinity of wood cellulose by heat treatment under dried and moist conditions*. *Journal of Wood Science*, 2000. 46(6), 431–436.
- BIRKINSHAW, C. AND HALE, M.D.** Mechanical properties and fungal resistance of acetylated fast grown softwoods. I. Small specimens, 2002. *Irish Forestry*, 59(1–2), 49–58.
- BOONSTRA, MICHIEL J. ; TJEERDSMA, BÔKE.** *Chemická analýza tepelně ošetřených jehličnatých dřev*. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 2006, 64,3: 204.
- BOONSTRA M. J., VAN ACKER J., KEGEL E., STEVENS M.** Optimisation of two stage heattreatment process – durability aspects, 2007. *Wood Sci Technol*, 41, s 31 – 57.
- BOONSTRA, M.J., TJEERDSMA, B.F. AND GROENEVELD, H.A.C.** Thermal modification of nondurable wood species. 1. The PLATO technology; thermal modification of wood. International Research Group on Wood Preservation, 1998. Doc. No. IRG/WP/98-40123.

CALLUM A.S. HILL *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes* © 2006 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-02172-1

ČERVENKA, MARTIN A KATARÍNA CIGÁNOVÁ, 1980. *Klíč k určování dřevin podle pupenů a větviček*. Přeložila Anna SKALICKÁ. Praha: SPN. Pomocné knihy pro žáky škol 1. a 2. cyklu.

GANDELOVÁ, LIBUŠE A JARMILA ŠLEZINGEROVÁ. *Stavba dřeva*. 2., nezměn. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. 187 s. ISBN 978-80-7375-966-7.

GARCIA-PEREZ, MANUEL A KOL. *Rychlá pyrolýza dřevní biomasy z řepkového oleje: vliv teploty na výnos a kvalitu produktů pyrolýzy*. Výzkum průmyslové a inženýrské chemie, 2008, 47,6: 1846-1854.

GIBBS, NICK, 2005. *Dřevo: obrazový přehled více než 100 druhů dřev včetně jejich využití*. V Praze: Slovart. ISBN 80-7209-720-2.

HILL, C.A.S., FORSTER, S., FARAHANI, M.R.M., HALE, M.D.C. AND WILLIAMS, G. *An investigation of cell wall micropore blocking as a possible mechanism for the decay resistance of anhydride modified wood*, 2005. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 55(1), 69–76.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Vyd. 1. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. 128 s. ISBN 80-7157-347-7.

KAČÍKOVÁ, D., KAČÍK, F. *Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave*. Zvolen. Technická univerzita vo Zvolene, 2011, ISBN 978-80-228-2249-7.

KAZI, F.K.M. AND COOPER, P.A. (2002). *Rapid extraction oxidation process to recover and reuse copper chromium and arsenic from industrial wood preservative sludge*. *Waste Management*, 22(3), 293–301. Keith, C.T. and Chang, C.I. (1978). *Properties of heat-darkened wood. I. Hygroscopic properties*. Report, Eastern Forest Products Laboratory, Canada, No. OPX213E.

KEITH, C.T. AND CHANG, C.I. *Properties of heat-darkened wood. I. Hygroscopic properties*. Report, Eastern Forest Products Laboratory, Canada, 1978. No. OPX213E.

MILITZ, HOLGER *Heat treatment technologies in Europe: Scientific background and technological state-of-art. Enhancing the durability of lumber and engineered wood products*. Forest Products Society, Kissimmee, FL, USA, February 11-13, 2002.

MILITZ, H. *Thermal treatment of wood: European processes and their background*. International Research Group on Wood Preservation, 2002. Doc. No. IRG/WP 02–40241.

- MITCHELL, R.L., SEBORG, R.M. AND MILLETT, M.A.** (1953). *Effect of heat on the properties and chemicals composition of Douglas-fir wood and its major components*. Journal of the Forest Products Research Society, 1953. 3(4), 38–42, 72–73.
- MUSIL, IVAN A JANA MÖLLEROVÁ.** *Lesnická dendrologie*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2005. 216 s. ISBN 80-213-1367-6.
- NUOPPONEN, M., VUORINEN, T., JÄMSÄ, S. AND VIITANIEMI, P.** The effects of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods, 2003. *Wood Science and Technology*, **37**(2), 109–115.
- NĚMEC, JAN, VÁCLAV JANDÁČEK A BOHUMIL HURDA.** *Dřevo: historický lexikon: [tradice z pohledu dneška*. Praha: Grada, 2005. 80 s. ISBN 80-247-1187-7.
- POŽGAJ, A., et al.** *Structure and wood properties (Štruktúra a vlastnosti dreva)*. Priroda, Bratislava, 1997, 485.
- PFRIEM, Alexander a kol.** Použití dřeva tepelným zpracováním hudebních nástrojů. In: *Proceedings of the Second European Conference on Wood Modification, Göttingen* . 2005. s. 390-397.
- PRAKTICKÁ KNIHA O DŘEVĚ**, 2009. 2. vyd. Přeložil Lumír MIKULKA. Čestlice: Rebo. ISBN 978-80-255-0205-1.
- REINPRECHT, L.; VIDHOLDOVÁ Z.** *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. Vyd. Zvolen: TU Zvolen, 2008. 89 s. ISBN 978-80-228-1920-6
- REINPRECHT L.** *Ochrana dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 453 s. ISBN 978- 80-228-1863-6
- REINPRECHT L.** *Drevoznehodnocujúce huby*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2005. ISBN: 9788022815352
- REINPRECHT, Ladislav a Miloš PÁNEK**, 2016. *Trvanlivost a ochrana dřeva*. V Praze: Česká zemědělská univerzita. ISBN 978-80-213-2660-6.
- REINPRECHT, L.** *Strength of deteriorated wood in relation to its structure*. Technická univerzita vo Zvolene, 1992.
- REINPRECHT L.** *Procesy degradácie dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1996. 150 s.
- 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.** *The Chemistry of Solid Wood* (Advances in Chemistry Series, No. 207), 1984, ISBN: 9780841207967

- ROWELL, R.M. AND ELLIS, W.D.** *Determination of the dimensional stabilization of wood using the water-soak method.* *Wood and Fiber*, 1978. 10(4), 104–111.
- RUSCHE, H.** *Thermal degradation of wood at temperatures up to 200 deg C. I. Strength properties of wood after heat treatment.* *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1973. 31(7), 273–281.
- SAILER, M. AND RAPP, A.O.** *Influence of different resin treatments on the dimensional stability of wood.* *International Research Group on Wood Preservation*, 1997. Doc. No. IRG/WP 97-40090
- TJEERDSMA, B.F., STEVENS, M., MILITZ, H. AND VAN ACKER, J.** Effect of process conditions on moisture content and decay resistance of hydro-thermally treated wood, 2002. *Holzforschung und Holzverwertung*, 54(5), 94–96, 98–99.
- TJEERDSMA, B.F., BOONSTRA, M. AND MILITZ, H.** *Thermal modification of non-durable wood species 2. Improved wood properties of thermal treated wood.* *International Research Group on Wood Preservation*, 1998. Doc. No. IRG/WP/98-40124.
- TJEERDSMA, B.F., STEVENS, M. AND MILITZ, H.** *Durability aspects of (hydro)thermal treated wood.* *International Research Group on Wood Preservation*, 2000. Doc. No. IRG/WP 00-40160.
- TSOUMIS, George T.** *Science and technology of wood: Structure, Properties, Utilization.* 2. vyd. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 s. ISBN 0-442-23985-8.
- ÚRADNÍČEK, LUBOŠ A PETR MADĚRA.** *Dřeviny České republiky.* Písek: Matice lesnická, 2001. 333 s. ISBN 80-86271-09-9.
- WAGENFÜHR, RUDI,** 2002. *Dřevo: obrazový lexikon.* Praha: Grada. ISBN isbn80-247-0346-7.
- WAGENFÜHR, Rudi.** *Holzatlas.* 5. vyd., Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2000. 707 s. ISBN 3-446-21390-2.
- WEILAND, J.J. AND GUYONNET, R.** *Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy.* *Holz als Roh- and Werkstoff*, 2003. 61(3), 216–220.
- ZEIDLER, ALEŠ A VLASTIMIL BORŮVKA.** *Stavba a vlastnosti dřeva hospodářsky významných dřevin - podklady pro cvičení.* V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. 89 s. ISBN 978-80-213-2674-3.

7.2. Webové zdroje a elektronické dokumenty

BEHR, Georg, et al. *Improvement of mechanical properties of thermally modified hardwood through melamine treatment.* Wood Material Science & Engineering, 2018, 13.5: 262-270.

BIORESOURCES [online]. RetificatedWood, 2021. [cit. 2021-03-1]. Dostupné z WWW: <<https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/index>>.

BOTANY [online]. 2017. [cit. 2021-03-15] Dostupné z WWW: <<https://botany.cz/cs/fagus-sylvatica/>>.

BUTTERFIELD, B. G. A B. A. MEYLAN. *Three-dimensional structure of wood: An Ultrastructural Approach* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1980. [cit. 2021-03-26]. DOI: 10.1007/978-94-011-8146-4. ISBN 978-94-011-8148-8.

CZECH FOREST TT, Z.S.: *Zastoupení skupin dřevin v ČR* [online]. 2018. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.czechforest.cz/informace-o-lesich>>.

FTWA (Finnish ThermoWood Asociation). [online]. *ThermoWood*. Helsinki: Finnish ThermoWood Asociation, 2017 [cit. 2021-03-1]. Dostupné z WWW: <https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/thermo_eng.pdf>.

ITWA (International ThermoWood Asociation) [online]. *ThermoWood Handbook* 2017. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z WWW: <<https://www.thermowood.fi/1>>.

LAHTELA, VILLE; KÄRKI, TIMO. *The influence of melamine impregnation and heat treatment on the fire performance of Scots pine (Pinus sylvestris) wood.* Fire and Materials, 2016, 40.5: 731-737.

MAYES, D., OKSANEN, O. *Thermowood(r) Handbook.* [online]. 2003. Finsko [cit. 2021-02-26]. Dostupné z WWW: <http://www.thermowood.fi/data.php/200312/795460200312311156_tw_handbook.pdf>.

NIS - NÁBYTKÁŘSKÝ INFORMAČNÍ SYSTÉM *Mikroskopická stavba listnatých dřevin* [online]. 2013. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.n-i-s.cz/cz/mikroskopicka-stavba-listnatych-drevin/page/322/>>.

PROKOM *Povrchová úprava materiálu ThermoWood.* [online]. 2020, [cit. 2021-02-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.prokom.cz/thermowood-tepelneupravene-drevo/nater-owatrol-aquadecks-na-thermowood-tepelne-upravene-drevo.pdf>>.

PRO LIGNO *Scientific journal in the field of wood engineering* [online]. 2019. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z WWW: <<https://www.proligno.ro/en/>>.

UNISTROY *Technology of wood impregnation by polymeric compositions* [online]. wood impregnation 2017. [cit. 2021-03-13]. Dostupné z WWW: <[https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/7\(58\)/03_chernenko_58.pdf](https://unistroy.spbstu.ru/userfiles/files/2017/7(58)/03_chernenko_58.pdf)>.

WANG, Xinzhou, et al. *Multi-Scale Evaluation of the Effect of Phenol Formaldehyde Resin Impregnation on the Dimensional Stability and Mechanical Properties of Pinus Massoniana Lamb.* *Forests*, 2019, 10.8: 646.

ZICHA, ONDŘEJ, ED. BIOLOGICAL LIBRARY *Taxonomic tree of plants and animals with photos.* *BioLib.cz* [online]. Praha: BioLib, 1999. [cit. 2021-03-15]. Dostupné z WWW: <<https://www.biolib.cz/>>.

7.3. Normy

ČSN 49 0103 *Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach.* Praha: Český normalizační institut, 1979. 8s.

ČSN 49 0108 *Drevo. Zisťovanie hustoty.* Praha: Český normalizační institut, 1993. 8s.

ČSN 49 0115 *Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe.* Praha: Český normalizační institut, 1979. 8s.

ČSN 49 0117 *Drevo. Rázová húževnatosť v ohybe.* Praha: Český normalizační institut, 1980. 8s.

ČSN EN 310 *Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu.* Praha: Český normalizační institut, 1996. 8s.

ČSN EN 113 *Ochranné prostriedky na drevo - Zkušební metody pro stanovení ochranné účinnosti proti dřevokazným houbám Basidiomycetes - Stanovení hranice účinnosti.* Praha: Český normalizační institut, 1998. 28s.

ČSN 49 0126 *Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania napúčavosti.* Praha: Český normalizační institut, 1989. 20s.

ČSN EN 252 *Postup zkoušek pro zjišťování relativní účinnosti ochranného prostředku na drevo ve styku se zemí ve volné prírodě.* Brusel, 2015. 24s.

ČSN EN 13823 *Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výroky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu.* Praha: Český normalizační institut, 2020. 108s.