

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra základního zpracování dřeva



Porovnání tepelně upraveného dřeva jedle a smrku z pohledu jeho užitkových vlastností

Diplomová práce

Autor: Vojtěch Kanát
Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Vojtěch Kanát

Dřevařské inženýrství

Dřevařské inženýrství

Název práce

Porovnání tepelně upraveného dřeva jedle a smrku z pohledu jeho užitkových vlastností

Název anglicky

Comparison of Heat-Treated Fir and Spruce Wood from the Point of View of its Utility Properties

Cíle práce

Cílem práce je posoudit vliv tepelné úpravy (180 °C a 200 °C) na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva jedle bělokore (Abies alba Mill.) a smrku ztepilého (Picea abies (L) Karsten) z lokalit České republiky, zejména pak z pohledu užitkových vlastností.

Metodika

1. Zpracovat literární rešerši o zkoumaných dřevinách, procesu termické úpravy dřeva (termodřevu), hodnocených vlastnostech a o faktorech ovlivňujících jejich proměnlivost.
2. Zajistit reprezentativní vzorky dřeva jedle bělokore a smrku ztepilého pro vykonání zkoušek a na relevantním počtu provedení termické úpravy.
3. Standardizovanými postupy na zkušebních tělesech stanovit barvu, hustotu, bobtnání, smáčení, statickou a dynamickou pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu, tvrdost a drsnost.
4. Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě, a porovnat zjištěné hodnoty s dostupnými údaji v odborné literatuře.
5. Analyzovat rozdíly ve vlastnostech dřeva před a po termické úpravě, jejich příčiny pro dané dřeviny, a to i z pohledu užitkových vlastností.

Doporučený rozsah práce

60 – 80 stran

Klíčová slova

dřevo, jedle bělokorá, smrk ztepilý, termická úprava, fyzikální a mechanické vlastnosti, variabilita vlastností

Doporučené zdroje informací

ČSN EN ISO 11664-4, ČSN EN ISO 11664-6, ČSN 49 0103, ČSN 49 0108, ČSN 49 0115, ČSN 49 0116, ČSN 49 0117, ČSN 49 0126, ČSN EN 1534, ČSN EN ISO 4287

Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, 258 s. ISBN 0-419-25550-8.

Hill, C.A.S. (2006). Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes; John Wiley & Sons: London, UK, 260 s. ISBN 978-0-470-02172-9.

ITA (International Thermowood Association). Thermowood Handbook; International Thermowood Association: Helsinki, Finland, 2003; Dostupné online:

[https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.](https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf)

[fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf) (přístupné k 28.3.2019).

Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva, Príroda a.s., Bratislava, 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

Reinprecht, L. Vidholová, Z. (2011). Termodrevo. Česká republika. ŠMÍRA-PRINT, 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7.

Reinprecht, L. (2016). Wood Deterioration, Protection and Maintenance, John Wiley & Sons, Oxford, United Kingdom. 376 s. ISBN 978-1-119-10653-1.

Tsoumis, G. (1991). Science and technology of wood – structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall, 497 s. ISBN 0-412-07851-1.

Wagenführ, R. (2000). Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag, 707 s. ISBN 978-3446213906.

Zobel, B. J., and Buijtenen, J. P. (1989). Wood Variation: Its Causes and Control, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 363 s. ISBN 978-3-642-74071-8.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 2. 4. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 20. 05. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Porovnání tepelně upraveného dřeva jedle a smrku z pohledu jeho užitkových vlastností“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vlastimila Borůvky, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne 15. 6. 2020

Poděkování

Rád bych zde poděkoval Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D. za odborné vedení práce a také za shovívavost v případech pozdních příchodů. Dále děkuji Ing. Tomáši Holečkovi za zajištění zkušebních těles a pomoc a rady při měření.

Abstrakt

Dřevo smrku ztepilého (*Picea abies*) a jedle bělokoré (*Abies alba*) bylo tepelně upraveno procesem Thermowood při teplotách 180 °C a 200 °C a 3 hodiny dlouhé hlavní fázi úpravy. Byly měřeny fyzikální vlastnosti zahrnující hustotu, drsnost, barvu, smáčivost a bobtnání a mechanické vlastnosti zahrnující statickou pevnost a modul pružnosti v ohybu, rázovou houževnatost a tvrdost. Hlavním cílem práce bylo posoudit vliv faktoru úpravy na změnu jednotlivých vlastností a zjistit, zda je tento vliv významně rozdílný u smrku a jedle. Statisticky významný rozdíl vlivu teploty na jedli byl nalezen u smáčivosti, objemového bobtnání a tangenciálního bobtnání. Ostatní sledované vlastnosti se příliš nevykají obecným trendům, nicméně u některých vlastností byly pozorovány výraznější odchylky od běžných hodnot.

Klíčová slova:

Smrk, jedle, tepelná úprava, dřevo, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti

Abstract

The Wood of Norway spruce (*Picea abies*) and European silver fir (*Abies alba*) was thermally modified according to the Thermowood process at temperatures 180 °C and 200 °C with the duration of the main phase of treatment for 3 hours. Physical properties including density, roughness, colour, wettability, and dimensional stability through swelling, as well as mechanical properties including static bending strength, bending modulus of elasticity (MOE), impact bending strength and hardness were measured. The main aim of the thesis was to assess the influence of temperature of treatment on the wood properties and find out if there is a significant difference in this influence on spruce and fir wood. Statistically significant difference was found for wettability, volumetric swelling, and tangential swelling. Other measured properties are in line with common trends, nevertheless, for some properties more significant deviations have been observed.

Keywords:

Spruce, fir, thermal treatment, wood, mechanical properties, physical properties

Obsah

1. ÚVOD	9
2. CÍL PRÁCE	10
3. ROZBOR PROBLEMATIKY	11
3.1. Posuzované dřeviny	11
3.1.1. Smrk ztepilý	11
3.1.2. Jedle bělokorá	12
3.2. Vlastnosti posuzované v práci	12
3.2.1. Hustota	12
3.2.2. Barva	13
3.2.3. Vlhkost	14
3.2.4. Drsnost	16
3.2.5. Smáčivost	18
3.2.6. Bobtnání a sesychání	21
3.2.7. Pevnost v ohybu	22
3.2.8. Pružnost dřeva a modul pružnosti	23
3.2.9. Houževnatost	24
3.2.10. Tvrdost	25
3.3. Termická modifikace dřeva	26
3.3.1. Proces Thermowood®	27
3.3.2. Oil heat treatment	30
3.3.3. Plato proces	31
3.3.4. Retification a Bois perdure	31
3.4. Změny v upraveném dřevě	32
3.4.1. Změny v chemickém složení a stavbě	32
3.4.2. Změny fyzikálních vlastností	33
3.4.3. Změny mechanických vlastností	35
4. METODIKA	37
4.1. Příprava vzorků a organizace měření	37

4.2.	Tepelná úprava vzorků	38
4.3.	Měření	39
4.3.1.	Stanovení hustoty	39
4.3.2.	Stanovení barvy	39
4.3.3.	Stanovení vlhkosti	40
4.3.4.	Stanovení drsnosti	41
4.3.5.	Stanovení smáčivosti	41
4.3.6.	Stanovení bobtnání	42
4.3.7.	Stanovení pevnosti v ohybu a statického modulu pružnosti	42
4.3.8.	Stanovení houževnatosti	44
4.3.9.	Stanovení tvrdosti	45
4.3.10.	Statistické zpracování dat	45
5.	VÝSLEDKY A DISKUZE	47
5.1.	Hustota	48
5.2.	Statický modul pružnosti	48
5.3.	Pevnost v ohybu	49
5.4.	Houževnatost	50
5.5.	Tvrdost	52
5.6.	Barva	53
5.7.	Drsnost	54
5.8.	Smáčivost – kontaktní úhel	55
5.9.	Bobtnání	56
5.10.	Souhrnné zhodnocení	57
6.	ZÁVĚR	59
7.	POUŽITÉ ZDROJE	61
8.	SEZNAM GRAFŮ, OBRÁZKŮ, TABULEK A PŘÍLOH	65
9.	PŘÍLOHY	67

1. Úvod

Tepelná úprava dřeva není žádnou novinkou. I když pomineme primitivní úpravy jako opalování povrchu dřeva, například dřevěných kůlů, otevřeným plamenem používané po dlouhá staletí až tisíciletí, má zkoumání tepelné úpravy dřeva již stoletou historii. Již roku 1920 zkoumal Tiemann účinky zvýšených teplot na dřevo. Významnější studie dále probíhaly ve čtyřicátých a padesátých letech a dále v průběhu celé druhé poloviny dvacátého století, např. Stamm a Hansen (1937), Seborg a kol. (1945, 1953), Kollmann a Schneider (1963), Rusche (1973) a Hillis (1984). Komerční využití tepelné úpravy dřeva přišlo až s finskou technologií Thermowood roku 1997, Plato Wood z Nizozemí, OHT z Německa a Bois Perdure a Rectification z Francie. (Hill, 2006; Esteves a Pereira, 2009)

Zavedených technologií existuje více, publikovaných výzkumů na dané téma je mnoho. Problém spočívá v obsáhlosti pojmu tepelná úprava. Obecně se jako tepelná úprava počítá vystavení dřeva teplotám nad 100 °C, případně 130 °C. Vrchní teplotní hranice úpravy dřeva při uskutečněných výzkumech se pohybuje okolo 260 °C. Druhý významný faktor je doba trvání působení tepla. Ten nabývá od desítek minut až po několik dní. Výrazně rozdílné výsledky také poskytují úpravy různých dřevin. V neposlední řadě se také výzkumy liší atmosférou, ve které úprava probíhala. Z nejčastějších se dá zmínit vzduch s normálním obsahem kyslíku, vzduch se sníženým obsahem kyslíku, vodní pára, dusík, olejová lázeň. Tyto a další faktory způsobují výraznou proměnlivost výsledků úprav a závislosti změn ve dřevě na teplotě či času nejsou vždy lineární či jinak předvídatelné. Kvůli tomu je třeba porovnávat data naměřená za stejných podmínek, ne-li na vzorcích, které byly upraveny společně. I dva různé teplotní cykly, byť se stejnými parametry, mohou mít za výsledek mírně rozdílnou míru úpravy. Stejně jako i rozmístění v termovací komoře hraje určitou roli.

Smrk byl zkoumán v mnoha studiích a je i nejvyužívanější dřevinou při průmyslovém komerčním zpracování. Nicméně jedle bělokorá tolik dat nemá. Navíc je tato práce součástí rozsáhlejšího projektu na Fakultě lesnické a dřevařské, kde se k porovnání přidává ještě jedle obrovská.

2. Cíl práce

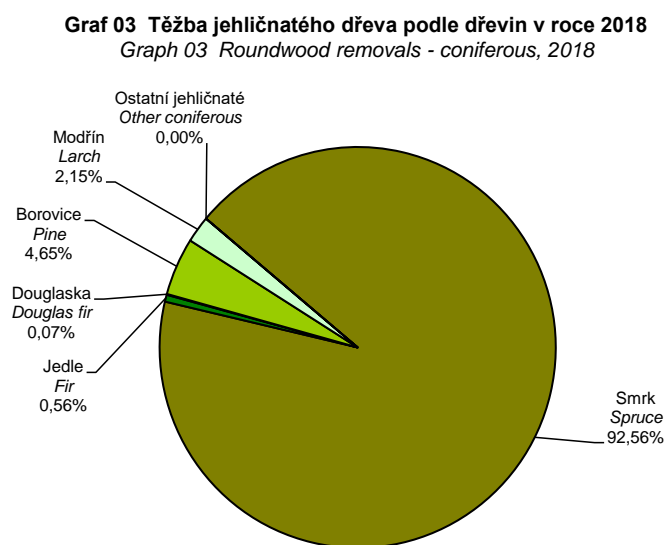
Cílem této diplomové práce bylo zhodnotit fyzikální a mechanické vlastnosti tepelně upraveného dřeva smrku ztepilého a jedle bělokoré, výsledky dvou úrovní tepelné úpravy – 180 °C a 200 °C – porovnat s hodnotami v neupraveném stavu. Posuzované vlastnosti zahrnují barvu, drsnost, smáčivost, tvrdost, pevnost v ohybu, rázovou houževnatost, modul pružnosti v ohybu a bobtnání. Zjištěné hodnoty statisticky zpracovat a vzájemně porovnat změny v důsledku úpravy u smrku a jedle, stejně jako porovnat s údaji v odborné literatuře.

3. Rozbor problematiky

3.1. Posuzované dřeviny

3.1.1. Smrk ztepilý

Smrk ztepilý, latinsky *Picea abies*, anglicky *Norway spruce* nebo také *European spruce*, je nejvíc těženou dřevinou v České republice. (ČSÚ, 2019) Patří mezi jehličnaté dřeviny, má světlé dřevo bez znatelného jádra. Přítomné jsou pryskyřičné kanálky, výjimkou nejsou ani smolníky. Hustota při 12% vlhkosti se pohybuje v rozmezí 350-400 kg.m⁻³. Dřevo je měkké, lehkobitelné, využívá se od nábytkářství přes stavebnictví až po výrobu aglomerovaných materiálů a chemické zpracování. (Zeidler, 2012; Požgaj a kol., 1993)



Obrázek 1: Graf těžby jehličnatého dříví v roce 2018 (ČSÚ, 2019)

Smrky obecně rostou v chladnějších částech severní polokoule, převážně v boreálním a mírném pásmu, přičemž se rozlišuje 34-40 druhů. V České republice je původním druhem pouze smrk ztepilý, v celé Evropě k němu přibývají ještě smrk omorika a smrk sibiřský. (Musil, 2003) Smrk ztepilý má dle Knihy Národní inventarizace lesů v České republice v letech 2011–2015 zastoupení mezi jednotlivými dřevinami 43 %. To

znamená, že tato jediná dřevina má téměř shodné procentuální zastoupení, jako všechny listnáče dohromady – 42,2 %.

3.1.2. Jedle bělokorá

Jedle bělokorá, latinsky *Abies alba*, anglicky *European silver fir* nebo *silver fir*, je stejně jako smrk ztepilý jehličnatá dřevina bez znatelného jádra, jedle oproti smrku nemá ani pryskyřičné kanálky ani smolníky. Hustota při 12 % vlhkosti se pohybuje v rozmezí 350-400 kg.m⁻³. (Požgaj a kol., 1993, Tsoumis, 1991) Využití jedle není tak významné, už vzhledem k množství vytěžené suroviny – 130 000 m³ b.k. jedle bělokorá versus 22 376 000 m³ b.k. smrk ztepilý, respektive 1 110 000 m³ b.k. borovice. (ČSÚ, 2018) Pro smrk jsou čísla samozřejmě zkreslena kůrovcovou kalamitou. I celkové zastoupení jedle ve výši 0,9 % nenaznačuje příliš velký potenciál pro dřevařský průmysl. Nicméně statistika zalesňování naznačuje, že by tomu mohlo být v budoucnu jinak. V roce 2018 bylo vysázeno 1 090 ha jedle bělokoré, což je 4,3 % z celkové rozlohy zalesněné daný rok. (ČSÚ, 2018) Nicméně i toto číslo je velmi vzdálené rekonstruovanému přirozenému zastoupení – cca 18 %. Navíc jedli postihuje dlouhodobý úbytek v horizontu již posledních dvou století. (Musil, 2003)

Hladká borka kmene jedlí má nezřídka v mládí pryskyřičné puchýřky, ve stáří je rozpukaná. Na hladkých větvičkách zůstávají listové jizvy kruhového tvaru. Samičí šištice rostou vzpřímeně a rozpadají se přímo na stromě. Původní rozšíření jedlí sahá od lesotundry na severu až po subtropy. V závislosti na zdroji je ve světě rozlišováno přibližně 40 druhů jedlí. Jedle bělokorá je v České republice jediným původním druhem, Evropa zahrnuje navíc *A. cephalonica*, *A. pinsapo* a *A. sibirica*. (Musil, 2003)

3.2. Vlastnosti posuzované v práci

3.2.1. Hustota

Hustota společně s vlhkostí patří mezi nejdůležitější charakteristiky dřeva. Vyjadřuje hmotnost vztaženou k danému objemu. Nejčastěji bývá udávána v kilogramech na m³ nebo gramech na cm³.

$$\rho = \frac{m}{V} [g \cdot cm^{-3}]$$

Hustota se mění s vlhkostí. U naprosté většiny dřevin (s výjimkou některých exotických dřev s hustotou nad 1000 kg.m^{-3}) se hustota zvyšuje s přibývajícím vlhkostí. Hustotu ovlivňuje také stavba dřevní hmoty, chemické složení a množství extraktivních látek. Mechanické vlastnosti silně korelují s hustotou, jelikož hustota dřevní substance, tj. pouze buněčných stěn, bez pórů a mezibuněčných prostor, je pro všechny dřeviny téměř shodná ($1\,535\text{--}1\,560 \text{ kg.m}^{-3}$). Tudíž čím je hustota daného dřeva vyšší, tím víc je v daných rozměrech hmoty, která zatížení nese, a méně vzduchu. Také poměr letního a jarního dřeva ovlivňuje hustotu, protože buněčné stěny letního dřeva jsou tlustší a mají menší lumeny. Tedy materiál s větším podílem letního dřeva má vyšší hustotu. Šířka letokruhů nemá jednoznačný vliv na hustotu a záleží také na typu dřeviny (kruhovitě/roztroušeně pórovité listnáče, jehličnany). (Požgaj a kol., 1997)

Vzhledem k tomu, že se hustota mění s vlhkostí, je pro korektní porovnání hodnot stanovených při různých měřeních potřeba determinovat hustotu, kterou dřevo má. Proto se většinou hustota uvádí při absolutní vlhkosti dřeva 12 % (odpovídá 65 % relativní vlhkosti vzduchu při $20 \text{ }^\circ\text{C}$) či v absolutně suchém stavu. Případně můžeme uvést hustotu při určité jiné vlhkosti, potom mluvíme o dřevě vlhkém. K tomu je nutné si uvědomit, že i hustota je proměnlivá a uváděné hodnoty jsou pouze průměry. (Dinwoodie, 2000)

3.2.2. Barva

Barva dřeva je jednou z doplňkových vlastností, která není důležitá z mechanického hlediska, ale může být výrazným faktorem při výběru materiálu pro výrobu nábytku, obkladů, doplňků a mnoha jiných použití, ve kterých je důležitý vizuální vjem, estetika. Dřevo může mít barvu od světlé, blížící se bílé, přes žlutou, světle hnědou, tmavě hnědou až černou. K tomu navíc mohou přibýt jiné barevné odstíny – například červená, fialová. Celulóza a hemicelulózy, které mají největší zastoupení ve složení dřeva, mají světlou barvu, která se často vyskytuje v bělovém dřevu a snadno může být zakryta jinými složkami. Barvu výrazně ovlivňují extraktivní látky obsažené zejména v jádrovém dřevu některých dřevin. Některé dřeviny, jako například zkoumaný smrk ztepilý a jedle bělokorá, viditelné jádro nemají, větší podíl zabarvujících extraktiv jim chybí, a tak má jejich dřevo stejnou barvu bez ohledu na jádro/běl. (Požgaj a kol., 1993; Dinwoodie, 2000; Tsoumis, 1991)

Pozorování a popisování barvy subjektivní metodou má své zásadní nedostatky a není vhodné pro dostatečně přesné hodnocení barvy či barevných změn. Proto se s rozvojem optických přístrojů začalo využívat objektivních metod měření barvy. Mezinárodní komise pro osvětlení (CIE) k tomuto účelu zavedla trichromatickou soustavu, pomocí které se dá popsat jakákoli barva viditelného spektra. Tři složky: L^* , a^* , b^* , kde každá popisuje jinou část. L^* značí světlost na stupnici od 0 do 100, přičemž 0 znamená maximálně tmavou barvu, 100 maximálně světlou. Barevné kanály a^* a b^* nabývají od záporných hodnot po kladné. Kanál a^* popisuje škálu zelená–červená, přičemž zelená barva je v záporném směru, červená v kladném. Kanál b^* popisuje škálu modrá–žlutá, přičemž modrá je v záporném směru, žlutá v kladném směru. Škálování kanálů a^* a b^* záleží na konkrétní aplikaci, nicméně většinou se používá ± 100 nebo $+ 127$ až $- 128$. Z uvedeného vyplývá, že pro neutrální středně šedou barvu jsou hodnoty $L^* = 50$, $a^* = 0$, $b^* = 0$. Číselné výsledky měření se poté dají exaktně porovnávat. Porovnávání přesných barev dřeva se hodí například při pozorování stárnutí dřeva, kdy se barva mění vlivem atmosférických podmínek, nebo také při tepelné úpravě dřeva, kdy se mění barva. (Požgaj a kol., 1997; Dinwoodie, 2000; Tsoumis, 1991)

3.2.3. Vlhkost

Reakce dřeva na vlhkost (nejen vzdušnou) je výrazná vlastnost ovlivňující práci se dřevem v celém procesu zpracování a následně i užívání. S rostoucí relativní vlhkostí vzduchu prostředí, ve kterém je dřevo přítomno, či dokonce při kontaktu s vodou v kapalném stavu roste i vlhkost obsažená ve dřevě. To má za následek především bobtnání, zvýšení hustoty a také v určitém rozmezí změnu mechanických vlastností. Vlhkost je také důležitá při zpracování materiálu – může být požadována nízká nebo naopak vysoká vlhkost dřeva či vlhkost v daném rozmezí, například při výrobě ohýbaného nábytku.

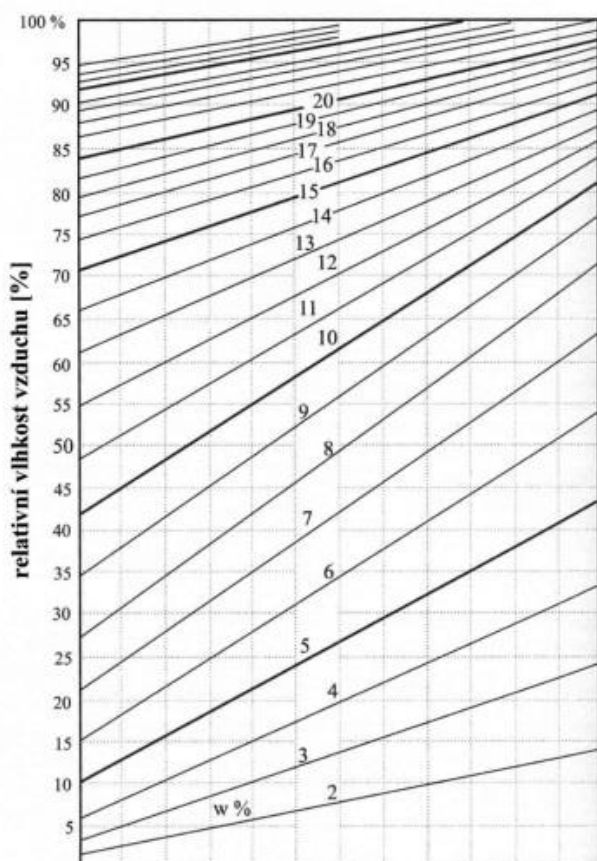
Vlhkost obsaženou ve dřevě rozdělujeme do tří skupin:

- Voda chemicky vázaná
- Voda vázaná
- Voda volná

Chemicky vázaná voda je obsažena ve sloučeninách tvořících samotné dřevo a není možné ji ze dřeva uvolnit jinak než spálením. Zároveň se množství chemicky vázané vody nemění s prostředím, kterému je materiál vystaven.

Oproti tomu množství vody vázané se mění v závislosti na podmínkách. Zahrnuje především molekuly vody navázané na vodíkových můstcích mezi jednotlivými řetězci celulózy a hemicelulózy. Má významný vliv na bobtnání/sesychání a v neposlední řadě i na mechanické vlastnosti. Každá dřevina má mírně rozdílnou hranici, nicméně při přibližně 30-% absolutní vlhkosti dřeva se materiál dostává do bodu maximálního nasycení vláken. Pokud dřevo i nadále přijímá vlhkost, přijímá ji jako vodu volnou. Pokud je materiál v prostředí s určitou relativní vlhkostí vzduchu a zároveň bez kontaktu s kapalnou vodou, přijímá vlhkost pouze do bodu nasycení vláken, tudíž pouze vodu vázanou.

Absolutní vlhkost dřeva závisí na teplotě vzduchu a relativní vlhkosti v něm



Graf 1: Absolutní vlhkost dřeva v závislosti na teplotě vzduchu a relativní vzdušné vlhkosti (Borůvka, 2016)

obsažené. 12-% absolutní vlhkost využívaná jako společná hodnota pro porovnávání výsledků z různých měření odpovídá podmínkám 65% relativní vlhkosti vzduchu a 20 °C, jak je vidět z **grafu č. 1**.

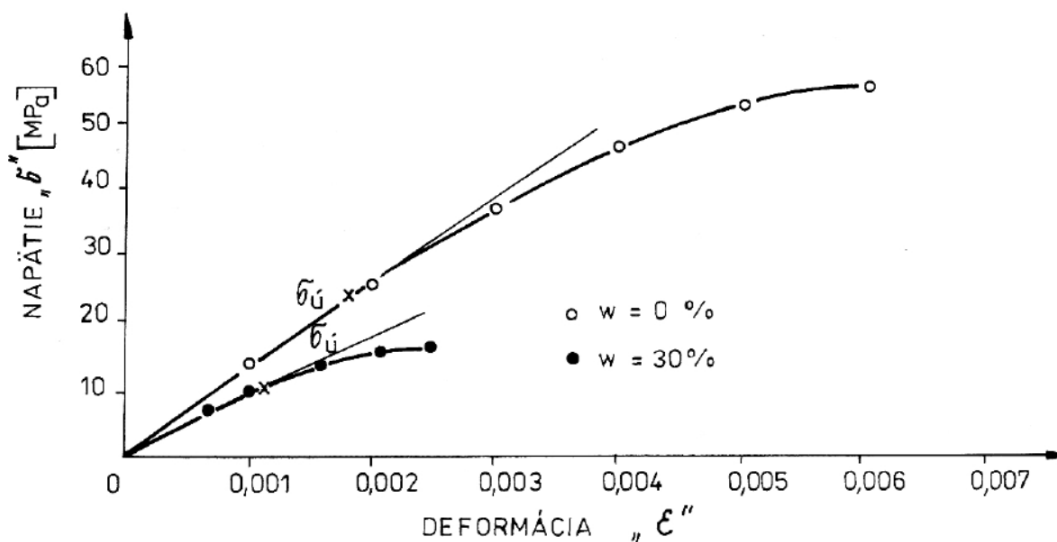
Vodu volnou obsahuje dřevní hmota po překročení bodu maximálního nasycení vláken. Nabírá ji pouze z vody v kapalném stavu. Voda volná se ve dřevě vyskytuje v pórech a lumenech buněk, neprobíhá její vázání na chemickou strukturu dřeva. Výrazněji tedy neovlivňuje mechanické vlastnosti, nicméně stále zvyšuje hustotu a například limituje výše zmíněné procesy ohýbání, jelikož je voda téměř nestlačitelná.

Změny obsahu vody vázané i

volné ve dřevě se nedějí ihned a je zapotřebí delšího času k proniknutí vlhkosti celým průřezem a vyrovnání v rámci vzorku. Mluví se tedy vždy o rovnovážné vlhkosti.

Vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti

Ve zkratce platí, že čím nižší vlhkost (v rámci rozpětí vody vázané), tím větší pevnostní a pružnostní vlastnosti dřevo má. Jsou ale významné rozdíly v rámci jednotlivých druhů namáhání či směrů. Například na namáhání tahem ve směru vláken nemá zvýšená vlhkost významný vliv, naopak namáhání tlakem je při obsahu vody vázané na mezi nasycení vláken výrazně ovlivněno – pevnost dřeva je téměř 3,8x nižší. Z uvedeného vyplývá, že vlhkost má vliv na namáhání dřeva ohybem. Posouvá se totiž rovina neutrálního napětí více směrem k tahové zóně. (Požgaj a kol., 1997)



Obrázek 2: Vliv vlhkosti na tlak ve směru vláken (Požgaj a kol., 1997)

3.2.4. Drsnost

Drsnost popisuje charakter povrchu tělesa. Dá se říci, že kvantifikování drsnosti je popsání rozdílu profilu povrchu tělesa od dokonale hladké roviny. Drsnost povrchu je v mnoha případech důležitá vlastnost. V případech, kdy dochází ke tření povrchů dvou předmětů, drsnost významně ovlivňuje součinitel tření. Zvláště důležitá je míra drsnosti v konečném stadiu procesu obrábění, kdy se vytváří finální podoba povrchu výrobku a připravuje se k aplikaci povrchové úpravy. (Požgaj a kol., 1997)

Drsnost dřeva je ovlivněna dvěma faktory: stavbou dřeva a způsobem a úrovní opracování. Právě heterogenní stavba s mnohdy i makroskopicky viditelnými rozdíly značně komplikuje přesné stanovení drsnosti porovnatelné mezi různými měřeními, na rozdíl například od kovů, které mají homogenní strukturu. I přes to doposud není stanovený jednotný postup měření drsnosti speciálně pro dřevo, který by bral v úvahu jeho stavbu. Tudiž se často používají postupy vyvinuté pro jiné, homogenní materiály. Přitom trend použití tenčích vrstev nátěrových hmot s úmyslem snížit jejich spotřebu klade na kvalitu povrchu a její měření vyšší nároky. Navíc stanovení drsnosti dřeva není pouze samotné měření, které vyprodukuje určitou hodnotu, ale na získaný profilograf je třeba aplikovat filtry a z takto upraveného výstupu poté vypočítat jednotlivé číselné parametry. (Gurau a Irle, 2017; Požgaj a kol., 1997)



Obrázek 3: Konfokální mikroskop k měření drsnosti

Nejjednodušší metodou hodnocení drsnosti dřeva je vizuální a hmatová kontrola. Tato metoda má očividný nedostatek – je subjektivní, není moc přesná a nad rámec základního slovního hodnocení prakticky vylučuje porovnání výsledků z různých zdrojů. Další metodou je pozorování odrazu úzkého paprsku světla od povrchu dřeva pomocí mikroskopu. Tato metoda má výrazně větší možnosti stanovení drsnosti, co do detailu, navíc jde o nekontaktní metodu. Na druhou stranu numerické popsání drsnosti je zdlouhavé a navíc je pozorována pouze jedna linie, ne plocha. Osvětlená plocha se dá změřit pomocí 3D snímkování digitální technikou s následným vyhodnocením povrchu pomocí výpočetní techniky. Problém může nastat u prvků, které shodně odrážejí světlo a ve snímku je nelze dobře rozeznat. Jiná metoda dávající přibližnou představu o průměrné drsnosti jako celku spočívá v proudění vzduchu mezi pozorovaným vzorkem a hladkou, rovnou měrkou. (Gurau a Irle, 2017)

Mezi nejčastější a dle poměrně rozšířeného názoru i nejpřesnější metody měření drsnosti patří 3D měření pomocí odrazu laserového paprsku a kontaktní snímání drsnosti jehlou (stylusem). Ač by se mohlo zdát, že technologie laseru s koherentním světlem schopným měřit vzdálenosti s velkou přesností je jednoznačně lepší, není tomu tak. Obě metody, laser i jehla, mají své výhody a nevýhody, limity. Mezi nevýhody jehly můžeme zařadit, že se jedná o kontaktní metodu, která teoreticky může ovlivňovat měřený povrch, zkreslení výsledků v případě zapadnutí špičky jehly do póru dřeva a vzhledem k velikosti hrotu jehly i neschopnost zaznamenat ty nejmenší nerovnosti. Nicméně běžně používaný hrot jehly pyramidového tvaru s úhlem 90° zakončený kulovou plochou o poloměru 2 nebo 5 μm by dřevo poškozovat neměl a zároveň nerovnosti pod jeho rozlišovací schopností nejsou příliš velké. Nedostatky použití laseru spočívají v občasných problémech se správným zaostřením, rozdílnou odrazivostí paprsku světla od různých částí struktury dřeva a dle některých v tendenci průměrovat nepravidelnosti. Nespornou výhodou obou metod je možnost zpracování výsledků výpočetní technikou. (Gurau a Irle, 2017; Požgaj a kol., 1997)

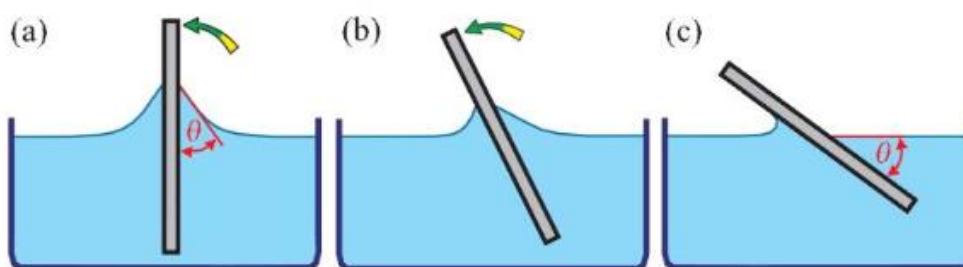
3.2.5. Smáčivost

Smáčivost vyjadřuje schopnost kapaliny přilnout k povrchu pevné látky, je jednou z charakteristik popisujících povrch tělesa. Ovlivňují ji děje na rozhraní jednotlivých skupenství – tuhého, kapalného a plynného. Tuhé skupenství představuje smáčený povrch

(v této práci zkušební tělesa smrku a jedle), kapalně skupenství sledovaná kapka (v tomto případě vody) a plynně skupenství okolní vzduch smíšený s vodní parou. Tato vlastnost je důležitá v mnoha zejména technologických procesech zpracování dřeva, přičemž mohou nastat jak situace, kdy potřebujeme smáčivost co nejvyšší, tak co nejnižší. Mezi důležité dřevařské procesy s požadovanou vysokou smáčivostí můžeme zařadit zejména impregnování, lepení a nanášení nátěrových hmot. Naopak nízká míra smáčivosti je vhodná jako výsledek impregnace dřeva či jiného procesu, který má za cíl zvýšit odolnost dřeva proti vodě. (Johnson a Dettre, 1993)

Míra smáčení je dána kombinací adhezních a kohezních sil povrchů dvou fází, které spolu interagují. Výsledné povrchové napětí je velice obtížné měřit, a proto se využívají jiné metody. Smáčivost může být charakterizována kontaktním úhlem – úhel mezi tečnou ke kapce v místě kontaktu s povrchem tuhého tělesa a rovinou povrchu tělesa. Čím větší je kontaktní úhel, tím je smáčivost horší. Naopak čím je kontaktní úhel menší, tím více je povrch smáčen. Nulový úhel je možný, teoretická horní hranice je 180° , nicméně v realitě to je vždy výrazně méně. (Kwok a Neumann, 1999)

Stanovení smáčivosti se dá provést více způsoby, nicméně jejich výsledky nejsou shodné a toto je třeba brát na zřetel při porovnávání jednotlivých výsledků získaných jinou metodou a brát je spíše jako orientační. K měření kontaktních úhlů existuje mnoho metod, jak tyto úhly stanovit. Mezi častěji používané patří měření úhlu na naklánějící se destičce a také měření na přisedlé kapce či přilnající bublině. (Kwok a Neumann, 1999)



Obrázek 4: Měření úhlu na naklánějící se destičce (Novák a kol., 2008)

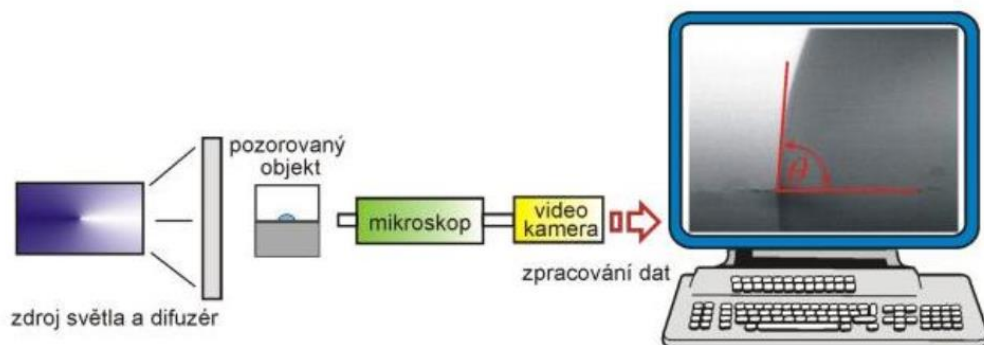
Měření úhlu na naklánějící se destičce

K provedení tohoto měření je třeba mít testovaný materiál ve formě destičky s danými rozměry. Ta je následně ponořena do kapaliny a tím se vytvoří rozhraní fází. Vlivem působících sil kapalina přilne k ponořenému materiálu. Naklápěním destičky na

jednu stranu se zmenšuje míra přilnutí kapaliny a v moment, kdy je hladina kapaliny rovná až ke styku s destičkou, se odečte úhel θ .

Měření úhlu na přisedlé kapce

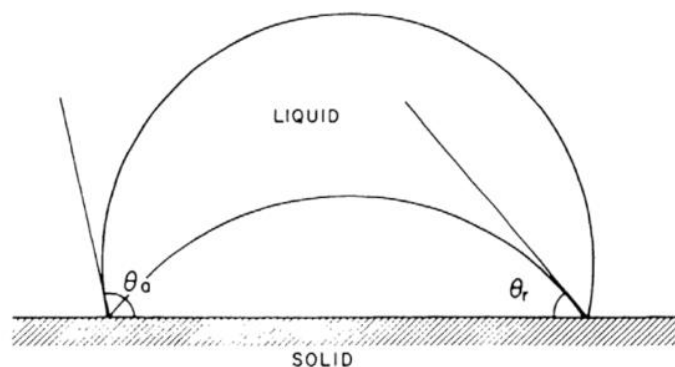
Měření úhlu na přisedlé kapce spočívá v nanesení kapky zkoumané tekutiny o definovaném objemu a měření úhlu, který svírá kapka a pevný materiál. Měřicí aparatura se sestává ze zdroje světla, difuzoru, přizpůsobeného mikroskopu, kamery a počítače.



Obrázek 5: Aparatura měření přisedlé kapky (Holub, 2010)

Zdroj světla vysílá světelný svazek rovnoběžný s rovinou testovaného vzorku a prosvěcuje nanesenou kapku. Mikroskop napojený na kameru či přímo kamera s příslušným objektivem přenáší obraz do počítače, kde probíhá vyhodnocení. Je také možné vyhodnotit úhel z pořízené fotografie či přímo mikroskopem s goniometrickou stupnicí. Nicméně současná výpočetní technika měření výrazně urychluje. Schéma ukazuje **obrázek č. 5**.

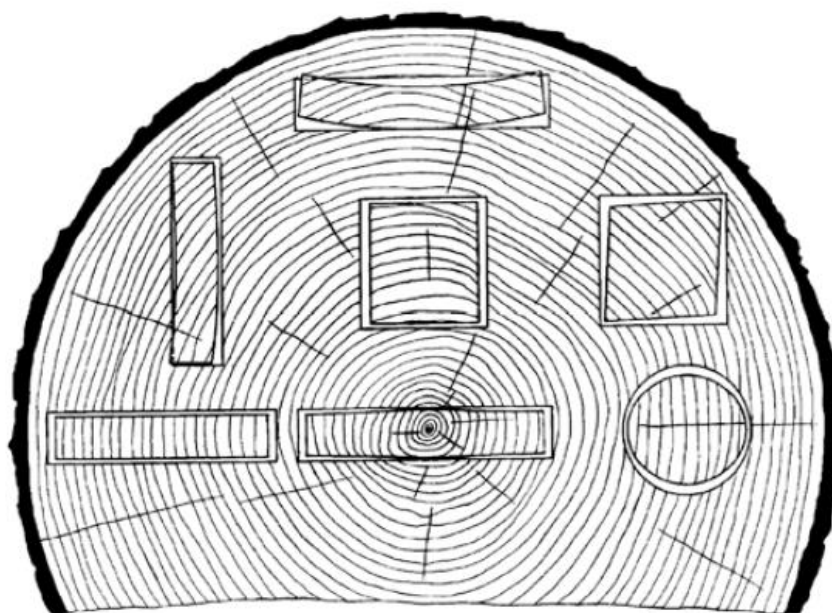
Měří se úhel mezi tečnou povrchu kapky vedenou bodem, ve kterém se kapka stýká se smáčeným materiálem, a rovinou smáčeného materiálu, viz. **obrázek č. 6**



Obrázek 6: Znázornění úhlů přisedlé kapky (Johnson, Dettre, 1993)

3.2.6. Bobtnání a sesychání

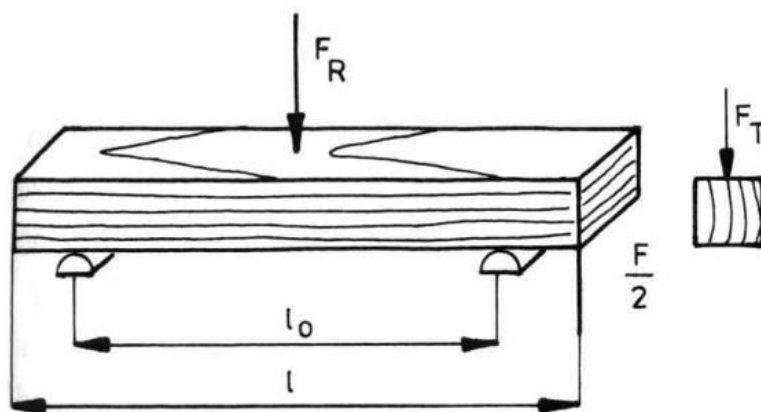
Pokud se zvýší, respektive sníží vlhkost dřeva v rozmezí od absolutně suchého stavu do bodu nasycení vláken, rozměry dřeva se zvětší, respektive zmenší, jelikož tloušťka buněčné stěny závisí na množství vody v ní vázané. Tuto skutečnost je třeba mít na vědomí zejména tam, kde jsou větší plochy dřeva v kuse – například podlahy, terasy a obklady fasád. Minimálně v exteriéru je třeba nechat mezi jednotlivými prkny dostatečnou mezeru, aby ani při maximálních rozměrech prkna nekolidovala. Další typický problém je sesychání větších průřezů dřeva. Rozdílná rychlost vysychání povrchových a vnitřních částí způsobuje pnutí a to často vede k trhlinám. Míra bobtnání a sesychání je ovlivněna hustotou – čím vyšší hustota, tím více se mění rozměry. Pro praktické použití považujeme změny rozměrů za lineární ve vztahu k přibývajícím vlhkosti. Změny rozměrů nejsou shodné ve všech směrech. Ve většině případů není třeba brát v úvahu bobtnání v podélném směru, jelikož dosahuje 0,1-0,2 %, důležitější jsou změny v radiálním a tangenciálním směru. Udává se, že přibližný poměr změn rozměrů v jednotlivých směrech je 20:10:1 (tangenciální, radiální, axiální směr). Tato skutečnost může působit další technologické problémy v případě pořezu dřeva ve vlhkém stavu s následným sušením. Tím, že každý směr sesychá jinak, výsledné suché řezivo nemá stejný poměr stran, jako mělo na začátku, může se kroutit nebo ztratit pravoúhlý charakter. (Bodig, 1982; Wood handbook, 2010)



Obrázek 7: Rozdíl ve změně tvaru po seschnutí řeziva v závislosti na původním umístění v kmeni (Wood handbook, 2010)

3.2.7. Pevnost v ohybu

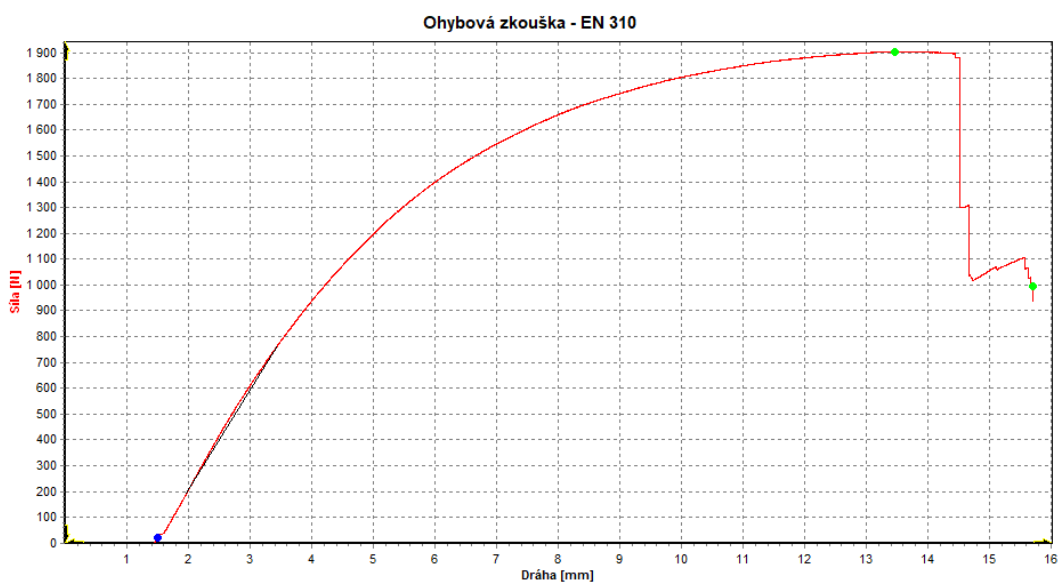
Pevnost v ohybu je jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností popisujících dřevo při použití zejména ve stavebnictví, jelikož v takovém případě působí většina zatížení právě na pevnost v ohybu. Ačkoli je možné zatížit dřevo na ohyb i jinými způsoby (například ve směru vláken), je obecně zkoumán pouze ohyb kolmo na vlákna v tangenciálním nebo radiálním směru. Jednak je pevnost v ohybu podél vláken výrazně nižší (přibližně 5-10 % z pevnosti v ohybu kolmo na vlákna), jednak se nevyskytuje řezivo potřebných rozměrů. (Požgaj a kol., 1993; Bodig, 1982; Tsoumis, 1991)



Obrázek 8: Způsob zatížení zkušebního tělesa při ohybové zkoušce (Požgaj, 1993)

Při zatížení ohybem je dřevo vystaveno tahovému, tlakovému a střižnému napětí. Tahové napětí je největší na vnější, konvexní, straně, tlakové napětí je největší na horní, konkávní straně. Směrem k takzvané neutrální vrstvě se obě napětí snižují. V neutrální rovině nepůsobí ani tahové, ani tlakové napětí, ale je přítomno maximální střižné napětí, které se naopak snižuje směrem ke krajům a na krajích je nulové. Pokud má materiál shodný modul pružnosti v tahu i tlaku, leží tato neutrální rovina uprostřed vzorku a tahové i tlakové napětí se zvětšuje lineárně až ke krajům. (Požgaj a kol.; 1993, Bodig, 1982; Tsoumis, 1991)

Při postupném zvětšování zatížení se nejprve objeví elastická, vratná, deformace. Následuje plastická, nevratná, deformace – dřevo na tlakové straně se bortí a po překročení meze pevnosti je těleso zlomeno. Jelikož má dřevo pevnost v tlaku přibližně jen jednu třetinu pevnosti v tahu, u dřeva bez vad (zejména suků) nastane vždy poškození na vnitřní straně, která je namáhána tlakem, výrazně dříve než na straně namáhané tahem. Až následně, s dalším zvětšováním zatížení a posunem neutrální osy směrem k tahové straně, dojde k porušení v tahové části. Na druhou stranu ve dřevě se sukky se pevnost v tlaku blíží pevnosti v tahu a může ji dokonce převýšit a v tu chvíli dojde nejprve k poškození tahové části. S výše uvedeným koresponduje i to, že pevnost v ohybu je větší než pevnost v tlaku, ale nižší než pevnost v tahu. U jehličnatých dřevin se zároveň uvádí, že mez pevnosti pro tangenciální ohyb může být o 10-12 % vyšší než pro radiální ohyb, pravděpodobně kvůli výraznějším rozdílům mezi letním a zimním dřevem a jejich poloze v krajních částech. U listnatých dřevin nebyly pozorovány významné rozdíly. (Dinwoodie, 2000; Požgaj a kol., 1993; Bodig, 1982)



Obrázek 9: Příklad grafu zaznamenávajícího zkoušku pevnosti v ohybu

3.2.8. Pružnost dřeva a modul pružnosti

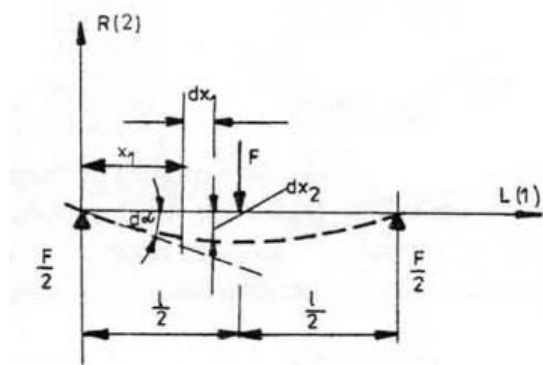
Pružnost (elasticita) vyjadřuje, zda se daný materiál vrátí do původního tvaru a rozměrů poté, co na něj přestane působit zatěžující síla. Dřevo je v porovnání s ostatními

materiály středně pružný materiál. Pružnost je velice důležitá vlastnost při mnoho použitích dřeva, a to oběma směry. V některých případech se hodí dřevo pružné – například některé sportovní potřeby nebo v minulosti hojně využívané luky. V jiných případech je zapotřebí dřevo co nejméně pružné – například u dřevostaveb bývá problém spíš s průhybem vodorovných konstrukcí než s mezí pevnosti. (Tsoumis, 1991; Wood handbook, 2010)

Pružnost dřeva je velice komplexní trojrozměrný jev a jeho přesné popsání není jednoduché. Nicméně při běžné praxi se používají moduly pružnosti, které říkají, jak moc je dřevo (ne)pružné, kolik síly je potřeba vyvinout, aby se dané dřevo elasticky zdeformovalo. E značí moduly pružnosti pro normálová namáhání – tlak, tah, ohyb, G značí moduly pro tangenciální namáhání – smyk, krut. V této práci je posuzován statický modul pružnosti v ohybu, taktéž nazývaný Youngův modul. Do určité hodnoty, nazývané mez úměrnosti, je přírůstek deformace přímo úměrný přírůstku napětí působícího na dřevo. V pracovním diagramu napětí–deformace je takový případ zanesený v podobě přímky. Modul pružnosti je pak můžeme vyjádřit následovně

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} [MPa]$$

kde E je modul pružnosti v MPa, $d\sigma$ přírůstek napětí v MPa a $d\varepsilon$ přírůstek deformace (bezrozměrný). (Tsoumis, 1991; Wood handbook, 2010; Požgaj a kol., 1997)



Obrázek 10: Průhybová čára (Požgaj, 1997)

3.2.9. Houževnatost

Houževnatost neboli dynamická pevnost v ohybu vyjadřuje množství práce, kterou je dřevo schopné absorbovat. Jde o důležitý parametr, jelikož hodnoty pro statický a

dynamický ohyb mohou být různé, a tudíž popsání pevnostních vlastností pouze statickým ohybem dává neúplnou představu o mechanických vlastnostech daného dřeva. Charakteristika lomu se mění v závislosti na křehkosti nebo houževnatosti dřeva. Křehké kusy mají tupý lom, houževnatější dřeviny mají lom naopak vláknitý, délka vláken souvisí s mírou houževnatosti. U jehličnatých dřevin je houževnatost vyšší v radiálním směru než v tangenciálním, u listnatých dřevin je tento rozdíl zanedbatelný. (Požgaj a kol., 1997)

3.2.10. Tvrdost

Tvrdost je jednou z doplňkových vlastností, která charakterizuje, jak moc je obtížné pro cizí předmět vniknout do dřeva. Tato vlastnost je důležitá zejména pro materiál určený k výrobě podlahovin, nábytku, sportovního vybavení a další použití, kde je potřeba dobrá



Obrázek 11: Tvrdoměr Struers Duravision-30

odolnost proti otěru. Tvrdost zároveň ovlivňuje opracování dřeva nástroji (ať už ručními nebo upnutými ve stroji) – zejména řezání, frézování, broušení a další. Rozdílných hodnot dosahuje tvrdost v axiálním směru v porovnání s radiálním či tangenciálním, přičemž rozdíl nepřímo úměrně koreluje s hustotou dřeviny. U lehkých, málo hustých dřevin to je

2,5x více v axiálním směru než v radiálním, respektive tangenciálním směru, u velmi hustých exotických dřevin se tento rozdíl snižuje až na 1,6násobek. Rozdíly mezi tangenciální a radiální tvrdostí nevykazují jednoznačné výsledky. (Požgaj a kol., 1993; Bodig, 1982; Tsoumis, 1991)

Na základě tvrdosti můžeme jednotlivé dřeviny rozdělit na měkké, středně tvrdé a tvrdé, přičemž tyto skupiny nemají přesné ohraničení a slouží k základní orientaci. Důležité je nezaměňovat s anglickými výrazy „softwoods“ a „hardwoods“, které označují jehličnaté, respektive listnaté dřeviny a nesouvisí přímo s tvrdostí konkrétní dřeviny. K měření tvrdosti není stanovena jednotná metoda, nicméně mezi nejčastější patří Brinellova a Jankova metoda. Jankova metoda spočívá v zatlačení polokoule o průměru 11,28 mm do hloubky rovnající se polovině průměru. Otlak má v tu chvíli plochu 100 mm², kterou se podělí síla potřebná k zatlačení. Brinellova metoda použitá v této práci je popsána v sekci Metodika. (Požgaj a kol., 1993; Bodig, 1982; Tsoumis, 1991)

3.3. Termická modifikace dřeva

Termická úprava, nebo také modifikace, má několik společných rysů napříč všemi používanými technologiemi. Kromě použití tepla to je zejména absence látek škodících životnímu prostředí. Buď je na úpravu použita pouze energie, nebo jsou další vstupy přírodního charakteru, například voda, rostlinný olej. Případné chemické sloučeniny jsou pouze pro úpravu. Modifikace dřeva obecně je dle Hilla (2006) definována následovně:

„Modifikace dřeva představuje proces, který je využit k vylepšení materiálových vlastností dřeva, ale produkuje takový materiál, který je na konci životního cyklu produktu možno zlikvidovat bez většího rizika pro životní prostředí, než by tomu bylo v případě nemodifikovaného dřeva.“

Modifikace by také měla být trvalá, na rozdíl od ochrany nátěrovými hmotami či napouštění oleji nebo vosky. Povrchová úprava pomocí nátěrových hmot působením okolních vlivů časem degraduje a mohou se objevit praskliny či se ochranná vrstva úplně opotřebuje a vymizí. Ochranu pomocí olejů a vosků je také třeba průběžně obnovovat. Velká část vlastností dřeva je definována jeho chemickým složením a stavbou. Modifikace dřeva často mění právě některé aspekty chemické stavby či složení a díky tomu jsou změny trvalé. (Hill, 2006)

Ke společným rysům různých postupů tepelné úpravy dřeva patří snížení rovnovážné vlhkosti, zvýšení rozměrové stability a tmavnutí materiálu. Při vyšších teplotách je zároveň pozorováno snížení pevnosti, zejména v ohybu. Mimo bezpočtu výzkumných prací sledujících změny dřeva po tepelné úpravě existuje několik komerčně aplikovaných technologií, které jsou zavedené ve výrobě. Patří mezi ně Thermowood, OHT (Oil Heat Treatment), Plato Wood, Bois Perdure, Rectification, WTT, Huber Holz a další. Liší se teplotou, atmosférou, ve které je dřevo upravováno, či tlakem. (Esteves a Pereira, 2009)

3.3.1. Proces Thermowood®

Metoda patentovaná v roce 1997 ve Finsku od Viitaniemi a kol. a spravovaná ITA (International Thermowood Association) je pravděpodobně zatím komerčně nejúspěšnějším způsobem termické úpravy dřeva. Dřevo je upravováno v atmosféře vzduchu smíchaného s vodní parou. Ta jednak snižuje množství kyslíku a jednak aktivně působí v procesu úpravy. Jsou stanoveny dvě základní kategorie teplot, Thermo-S a Thermo-D, pro jehličnaté a listnaté dřeviny: 190 °C a 212 °C, respektive 185 °C a 200 °C, kdy každá kategorie má mírně jiné určení. (Esteves a Pereira, 2009; ITA, 2003)

Písmeno „S“ v názvu Thermo-S znamená stabilitu. Dřevo upravené na tento stupeň by mělo získat vyšší odolnost vůči hnilobám, konkrétně třída 3 dle EN 113, a zároveň nižší míru bobtnání. V tangenciálním směru to činí 6-8 %. Při této teplotě by zároveň měla být zachována většina pevnosti. Dle ITA je Thermo-S vhodné na následující aplikace:

Tabulka 1: Použití Thermowoodu, kategorie Thermo-S

Jehličnany	Listnáče
Části staveb	Vybavení domácnosti
Vybavení domácnosti v suchých podmínkách	Příslušenství domácnosti
příslušenství domácnosti v suchých podmínkách	Nábytek
Nábytek	Podlahy
Zahradní nábytek	Konstrukce saun
Lavičky saun	Zahradní nábytek
Části dveří a oken	

Druhá varianta, Thermo-D, má znamenat odolnost. Vyšší teplota úpravy má za výsledek lepší odolnost proti hnilobě – třída 2 dle EN 113 a nižší míru bobtnání, resp. sesychání: 5-6 %. Mimo to i barva je výrazně tmavší než u Thermo-S.

Tabulka 2: Použití Thermowoodu, kategorie Thermo-D

Jehličnany	Listnáče
Opláštění budov	Stejné využití jako v případě Thermo-S, použije se, pokud je požadována tmavší barva.
Venkovní dveře	
Okenice	
Environmentální stavby	
Zařízení saun a koupelen	
Podlahy	
Zahradní nábytek	

Vstupní materiál

Na kvalitě vstupního materiálu záleží výsledek úpravy. Nejčastěji bývá upravován smrk, borovice, bříza a topol. Ale proces není limitovaný pouze na tyto dřeviny, nicméně každá dřevina se chová trochu jinak, a tak je potřeba pro každou proces upravit. Jelikož první fází úpravy je vysokoteplotní sušení, počáteční vlhkost není omezená na nějakou hodnotu. Pouze je třeba správně nastavit dobu sušení, materiálu s vysokou vlhkostí bude samozřejmě trvat déle, než se vysuší. Určitá omezení se týkají suků ve dřevě. V příručce vydané ITA jsou přesné specifikace přípustných vad, nicméně obecně jsou přípustné pouze srostlé suky. (ITA, 2003)

Úprava probíhá v komoře, která je schopna vyvinout teplotu potřebnou k úpravě, tj. cca až 220 °C, obsahuje generátor vodní páry a odtahový ventilátor. Veškeré vybavení je vyrobeno z nerezové oceli, jelikož proces úpravy působí korozivně (zejména kvůli působení vlhkosti). Celá úprava se dělí do tří fází:

1. **Vysokoteplotní sušení:** ve fázi 1 se dřevo suší při teplotách přesahujících 100 °C, typicky 100-130 °C. Tato fáze bývá nejdelší ze všech tří a doba trvání závisí na počáteční vlhkosti a tloušťce upravovaného dřeva, zároveň také na dřevině. Je cíleno na snížení vlhkosti téměř k nule.
2. **Samotná úprava:** Poté, co je dřevo vysušeno, začne se dřevo ohřívat postupným zvyšováním teploty. Pokud je rozdíl povrchové a vnitřní teploty menší než 30 °C a zároveň je použita vodní pára, netvoří se ve dřevě praskliny. V praxi platí, že čím nižší teplotní rozdíl je, tím ohřívání trvá déle, čím je rozdíl větší, tím je větší riziko vnitřních trhlin. Poté, co je dosažena teplota požadovaná k úpravě, je tato teplota udržována konstantní. Délka trvání této fáze závisí na dřevině, tloušťce dřeva a požadované míře úpravy. Obvykle se pohybuje v rozmezí 2-5 hodin. Čím delší doba úpravy, tím více jsou vlastnosti ovlivněny. Teplota úpravy závisí na dřevině, požadované míře úpravy a také na zvolené době trvání této fáze. Oficiálně používané teploty běžného Thermowood sortimentu jsou v rozmezí 185-212 °C, pro účely výzkumu je rozmezí využitelných teplot vyšší. Nicméně při výrazně nižších teplotách nebude dosaženo takových výsledků, naopak při teplotách vyšších budou velice výrazně ovlivněny mechanické vlastnosti.
3. **Ochlazení a klimatizace.** Po skončení fáze úpravy je dřevo řízeně ochlazováno až na hodnoty pod 100 °C. Stejně jako při ohřívání je třeba udržet rozdíl povrchových a vnitřních teplot pod 30 °C. I v této fázi je aplikována vodní pára, jelikož je třeba kompletně vysušenému dřevu postupně vrátit vlhkost. Klimatizace trvá 5-15 hodin, v závislosti na teplotě a tloušťce dřeva.

Při celém procesu je důležité použití vodní páry, která snižuje obsah kyslíku v okolní atmosféře, a především zabraňuje přílišnému rozdílu ve vysušení povrchu a vnitřku dřeva. Tím se zabrání vytvoření trhlin a zachovají se mechanické vlastnosti v maximální možné míře. (ITA, 2003; EP 0 759 1 37 B1)

3.3.2. Oil heat treatment

Další komerčně využívanou technologií je Oil heat treatment – tepelná úprava s pomocí oleje. V literatuře je většinou zmiňována pod zkratkou OHT. Tento proces pochází z Německa a tam také působí první společnost, která produkuje dřevo modifikované touto metodou. Většina přírodních olejů má vyšší bod varu, a tak je možné je použít k tepelné úpravě. Teploty používané v této metodě jsou v rozmezí 180-200 °C, pokud je vyžadována co největší odolnost a zároveň pevnost, 220 °C je použito v případě požadované maximální odolnosti a nejmenší spotřeby oleje.

Proces není rozdělen do jednotlivých fází jako u Thermowoodu, nicméně i zde se nejprve dřevo prohřívá. Do impregnačního kotle se napumpuje horký olej ze zásobního kotle a prohřívání začíná. Doba záleží zejména na rozměrech jednotlivých upravovaných kusů. Teplota oleje je už v této fázi víceméně shodná s teplotou úpravy. Doba úpravy 2-4 hodiny začíná ve chvíli, kdy stanovené teploty dosáhne střed dřeva. Následuje ochlazování a před vyjmutím upraveného dřeva se olej vypumpuje zpátky do zásobního kotle. Celý proces pro dřevo o rozměrech průřezu 100x100 mm trvá typicky 18 hodin.

K přenosu tepla na dřevo se používá surový rostlinný olej. Olej slouží ke dvěma základním prvkům – úprava probíhá kompletně bez přístupu kyslíku a zároveň je na dřevo rovnoměrně na celém povrchu přenášeno teplo. Absence přístupu kyslíku zvnějšku snižuje tepelnou oxidaci na minimum. Je možné využít lněný, slunečnicový, řepkový či jiný podobný olej. Je zejména důležité, aby použitý olej bezpečně vydržel teplotu úpravy. Například společnost Quijuk využívá při OHT úpravě dřeva lněný olej. (Quijuk, 2020) Mezi nevýhody použití oleje patří zápach při procesu úpravy a zejména zvýšení hmotnosti upraveného dřeva způsobené nasáknutím části olejové lázně. Nicméně nasáknutí oleje do dřeva probíhá v ochlazovací fázi, a tudíž se dá do jisté míry regulovat. Taktéž probíhá určitá změna v oleji – polymerizace vlivem tepla a kontaktu oleje s kyslíkem ve vzduchu i vlivem sloučenin (například extraktiv dřeva), které se do oleje uvolní. Tudíž je třeba kontrolovat stav opakovaně používaného oleje. (Rapp a Sailer, 2000; Esteves a Pereira, 2009)

Nejvíce je metoda prozkoumána pro smrk ztepilý a borovici lesní, nicméně podobně jako u metody Thermowood není OHT omezena pouze na tyto dva druhy a dá se použít na široké spektrum dřevin. Nicméně i smrk ztepilý modifikovaný metodou OHT splňuje

požadavky třídy 3 dle EN 113, za předpokladu vyšších nároků na odolnost je možné zvýšit množství oleje přijatého dřevem, což dodatečně zvyšuje ochranu. (Rapp a Sailer, 2000)

3.3.3. Plato proces

Plato postup používaný v Nizozemí má čtyři fáze. Nejprve je buď vlhké nebo na vzduchu vysušené dřevo umístěno po dobu 4-5 hodin v atmosféře horké páry s přetlakem 0,6-1 MPa. Tato fáze je nazývána hydrotermolýza. Teplota při této fázi se pohybuje mezi 160 °C a 190 °C. Při této fázi by se měly z hemicelulózy uvolňovat aldehydy a fenoly. Druhá fáze trávající 3-5 dní je sušení na přibližně 8-10% vlhkost. Další fáze totiž probíhá v suchých podmínkách: tentokrát při teplotách 170-190 °C a atmosférickém tlaku, doba trvání je 14-16 hodin. Přístup vzduchu, a tedy především kyslíku je omezen. V poslední fázi se upravené dřevo chladí a klimatizuje na vlhkost pro zamýšlené použití, tedy 4-6 %, což trvá přibližně 3 dny. Podmínky úpravy záleží na dřevině, rozměrech upravovaného materiálu a také na výsledném použití – konečná odolnost je od třídy 1 po třídu 3. Snížení bobtnání v tangenciálním směru se pohybuje od 15 do 40 %. Taktéž pevnost v ohybu se v závislosti na podmínkách úpravy snižuje o 5 až 18 %. (Esteves a Pereira, 2009; Homan 2004; Reinprecht, 2016)

3.3.4. Retification a Bois perdure

Retification pocházející z Francie se od výše zmíněných procesů liší absencí více fází, celý proces probíhá v jedné fázi. Spočívá v úpravě dřeva při teplotách 200-240 °C, přičemž okolní prostředí je naplněno dusíkem. Ten zajišťuje, že v atmosféře úpravy je maximálně 2 % kyslíku. Díky nízkému množství kyslíku projde dřevo i při nejvyšší teplotě jen částečnou pyrolýzou, která neovlivní zásadně mechanické vlastnosti, a zároveň je vylepšena odolnost proti biotickým vlivům a hydrofobní vlastnosti. Vstupní surovinou je dřevo vysušené na 12% vlhkost. (Esteves a Pereira, 2009; Reinprecht, 2008; Reinprecht 2011)

Bois perdure využívá čerstvé dřevo, na které je aplikováno rychlosušení pomocí horké páry a plynů uvolněných ze sušeného dřeva, znovu zavedených do sušící komory. Teplota je v rozmezí 200-240 °C. (Esteves a Pereira, 2009)

3.4. Změny v upraveném dřevě

3.4.1. Změny v chemickém složení a stavbě

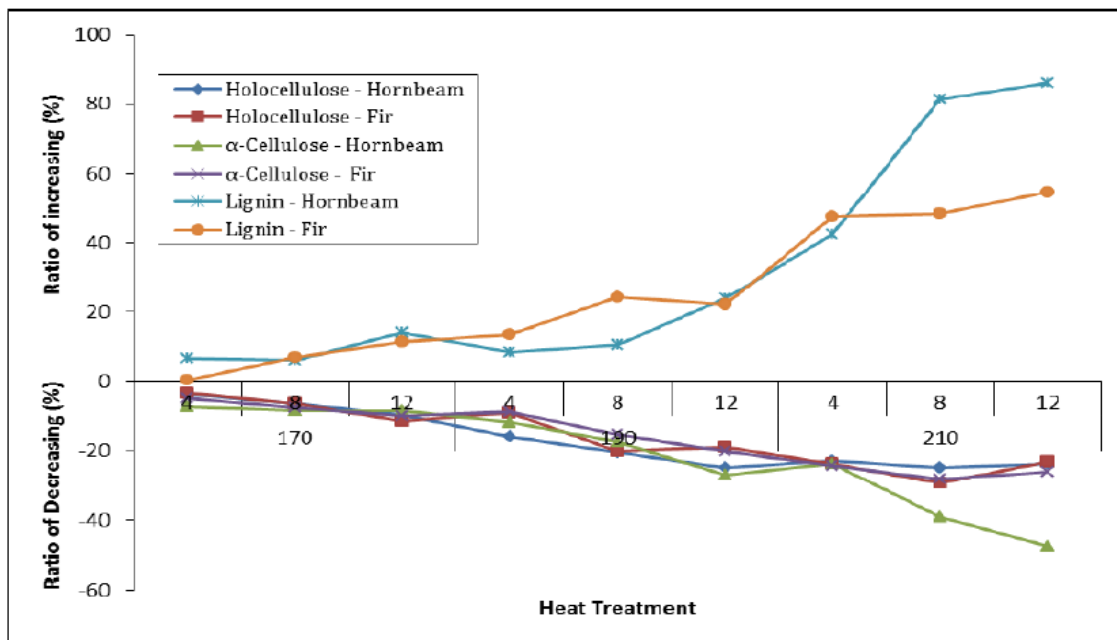
Při působení zvýšené teploty se částečně mění chemické složení a stavba, což má významný vliv na změny popsané dále. Panuje shoda, že chemické změny probíhají, celkem jasné je i, jaké dané změny jsou, nicméně nejsou jisté detaily a přesné reakce. Ani u teplot, na kterých dané změny začínají, nepanuje shoda a výsledky jsou značně různorodé. Výrazně záleží na konkrétním postupu úpravy, zejména teplotě a atmosféře, ve které úprava probíhá. Například při úpravě bez omezení přístupu kyslíku se zvýšeně tvoří karbonylové skupiny. (Esteves a Pereira, 2009)

Jako první se v procesu úpravy ve fázi sušení vytrácí voda volná a vázaná. Při teplotách nad 100 °C se uvolňují některé těkavé látky. Ze základních složek dřeva se nejprve začínají rozkládat hemicelulózy. Začíná deacetylace a vznikající kyselina octová působí jako katalyzátor další depolymerizace, při které vzniká formaldehyd a jiné aldehydy. Depolymerizace způsobená kyselinou octovou probíhá rychleji v uzavřených systémech, jelikož se zvyšuje její koncentrace v atmosféře termokomory. Zároveň se začíná snižovat i množství volných -OH skupin. Kromě kyseliny octové se tvoří i kyselina mravenčí, furany, metanol a plyny, převážně oxid uhličitý. Změny hemicelulóz významně ovlivňují výslednou rovnovážnou vlhkost dřeva. (Hill, 2006; Reinprecht, 2016)

Celulóza odolává vysoké teplotě výrazně lépe než hemicelulózy. Nejprve začíná degradovat méně odolná amorfni část celulózy a tím se zvyšuje procentuální podíl celulózy ve dřevě. Společně s degradací hemicelulóz je to jeden z důvodů, proč je tepelně upravené dřevo odolnější vůči biotickým činitelům, protože ti napadají nejdříve právě tyto dvě složky. Také se tím snižuje množství volných hydroxylových skupin a to přispívá ke snížení rovnovážné vlhkosti dřeva, společně se zmíněným množstvím hemicelulóz. Nicméně do 150 °C by celulóza měla zůstat nedotčená, přičemž se může objevit snížení polymeračního stupně. (Esteves a Pereira, 2009; Hill, 2006)

Lignin je ze všech základních složek dřeva nejvíce odolný zvýšeným teplotám. Dle některých studií při teplotách do 220 °C nedegraduje vůbec, či v podstatně menší míře, než hemicelulózy a celulóza. Procentuální podíl podobně jako u krystalické celulózy narůstá vlivem degradace hemicelulóz a amorfni celulózy. Podle některých studií degraduje již od nízkých teplot za vzniku fenolických produktů, ale v podstatně nižší míře než ostatní

složky dřeva. Nicméně podstatné degradativní změny byly pozorovány až od 280 °C a výše. Jistý dopad na některé vlastnosti je přisuzován síťování s ostatními molekulami ligninu. (Esteves a Pereira, 2009; Hill, 2006)



Graf 2: Chemické změny v tepelně upraveném dřevě jedle a habru (Tumen, 2010)

Extraktiva, která jsou minoritní součástí dřeva (běžně se udává zastoupení v dřevní hmotě do 5 %), zahrnují různé sloučeniny, například vosky, tuky, cukry, terpeny, fenoly. Většina z nich při úpravě vymizí. Zbylá extraktiva neovlivňují většinu vlastností, mohou působit při změně barvy. (Reinprecht, 2016; Hill, 2006)

3.4.2. Změny fyzikálních vlastností

Hygroskopicit a rovnovážná vlhkost dřeva

Snížení hygroskopicity je jednou z nejdůležitějších změn, kvůli kterým se tepelná úprava dělá, přičemž tato vlastnost zůstává i při vystavení měnícím se podmínkám. Nižší vlhkost dřeva je hlavním faktorem ovlivňujícím další žádané vlastnosti – zejména vyšší odolnost proti biotickým činitelům, snižuje míru bobtnání a sesychání, do jisté míry kompenzuje i zhoršení některých pevnostních vlastností. Míra snížení rovnovážné vlhkosti záleží zejména na teplotě a době trvání fáze úpravy, vliv má i médium, ve kterém úprava probíhá. Termická modifikace dřeva při teplotách 180-220 °C snižuje rovnovážnou vlhkost při 20 °C a 65% relativní vzdušné vlhkosti z 12 % na přibližně 6-10 % absolutní vlhkosti

dřeva, nicméně velice záleží na podmínkách a metodě úpravy. Mezi pravděpodobné důvody snížení rovnovážné vlhkosti dřeva patří snížení počtu hydroxylových skupin, také větší podíl krystalické celulózy oproti neupravenému dřevu, polykondenzační reakce ligninu vedoucí k síťování mohou také hrát roli. (Hill, 2006; Esteves a Pereira, 2009; Reinprecht, 2016)

Bobtnání a sesychání

Se snížením rovnovážné vlhkosti se výrazně pojí zlepšená rozměrová stabilita způsobená nižším sesycháním a bobtnáním. Bobtnání způsobené zvětšováním buněčných stěn v důsledku přijímání vázané vody není díky menší hygroskopicitě tak velké jako u neupraveného dřeva. Udávané snížení bobtnání se různí v závislosti na zdroji a použitém postupu úpravy, nicméně se většinou pohybuje v rozmezí 20-60 %. Pro tuto vlastnost je termicky upravené dřevo vhodné například na terasová prkna, podlahy či koupelňový nábytek. Kromě snížení hygroskopicity upraveného dřeva mohou k menším rozměrovým změnám vést také změny ve stavbě na chemické úrovni, zejména reakce ligninu, který při tepelné úpravě kromě částečné degradace a reakcí vzniklých produktů také do jisté míry síťuje s ostatními molekulami ligninu. (Hill, 2006; Esteves a Pereira, 2009; Reinprecht, 2016)

Ztráta hmotnosti a zmenšení rozměrů

Při tepelné úpravě dřevo ztratí část své hmotnosti, což je obvykle bráno jako ukazatel kvality úpravy. Je obtížné porovnávat hodnoty z různých úprav, jelikož ztráta hmotnosti je závislá na teplotě a trvání úpravy, stejně jako na dřevině. Také typ úpravy v čele s médiem přenášejícím teplo hraje významnou roli. Platí, že čím vyšší teplota a delší doba úpravy, tím větší je ztráta hmotnosti. Řádově se ztráta hmotnosti pohybuje v jednotkách procent, u vysokých teplot a delších časů úpravy (nad cca 210 °C a 6-8 hodin) se může dostat i přes 10 %. Se ztrátou hmoty se mění i rozměry upraveného dřeva, při úpravě se zmenší. To může být problém zejména u dřeva větších rozměrů. Pokud není správně nastaven proces úpravy, objevení trhlin není výjimkou. Spojením ztráty hmotnosti a změny rozměrů se mění i hustota. (Hill, 2006; Esteves a Pereira, 2009; Reinprecht, 2016)

Barva

Pokud dřevo projde tepelnou úpravou, ztmavne. Dá se tvrdit, že čím vyšší je teplota úpravy a čím delší je hlavní fáze úpravy, tím je barva tmavší, přičemž se zachovávají rozdíly makrostavby jako jarní/letní dřevo. Záleží také na dřevině a typ ohřevného média

hraje roli. Při úpravě na vzduchu dřevo tmavne více než při úpravě v páře nebo dusíku. Různá míra ztmavnutí v závislosti na teplotě se může vyskytnout i v rámci jedné várky úpravy, pokud jsou významnější rozdíly teploty v různých částí termokomory. Tmavší barva se připisuje extraktivům, která při úpravě ze dřeva nevymizela, zbytkům degradovaných hemicelulóz a produktům oxidačních reakcí. Ztmavnutí zůstává dlouhodobě, ale při působení povětrnostních vlivů barva časem také bledne. Ztmavnutí je jeden z důvodů, proč se termouprava dělá – potenciální částečné nahrazení tmavých exotických dřevin, které mohou být buď drahé, nebo je problematický jejich původ. (Hill, 2006; Esteves a Pereira, 2009; Tsoumis, 1991)



Obrázek 12: Změna barvy dřeva borovice v závislosti na teplotě. (ITA, 2003)

Smáčivost

Tepelně modifikované dřevo také vyniká nižší smáčivostí. Vyšší teploty úpravy vedou k nižší smáčivosti, kontaktní úhly kapaliny na povrchu dřeva jsou vyšší. Může to být dáno vznikem degradačních sloučenin, zvýšením krystalinity celulózy či plastifikací ligninu. Nízká smáčivost působí problémy při aplikaci některých nátěrových hmot a lepidel (například PVAc). (Hill, 2006)

3.4.3. Změny mechanických vlastností

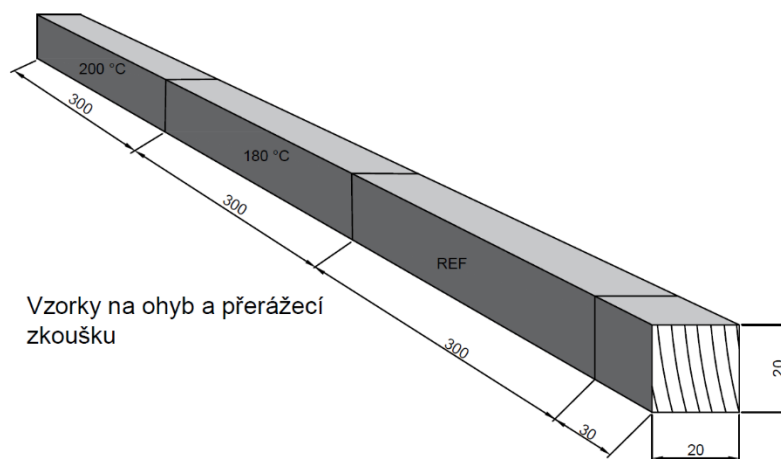
Největší nevýhodou tepelně upraveného dřeva je zhoršení mechanických vlastností. To nemusí nastat vždy, protože tyto změny závisí na teplotě, době trvání úpravy, dřevině, typu úpravy a také správném provedení. Zhoršení mechanických vlastností se objevuje až od určitých teplot, tudíž správným nastavením modifikačního procesu se dá docílit stavu,

kdy požadované změny již nastaly v dostatečném měřítku, zatímco mechanické vlastnosti ještě nejsou výrazně zhoršeny. Jehličnany jsou o něco odolnější než listnáče. Pevnost v ohybu se u jehličnanů výrazněji nemění ani při 180 °C, okolo 200 °C je již pokles pevnosti v ohybu výrazný i u jehličnanů. Ještě více je ovlivněna rázová houževnatost. Již při nižších teplotách úpravy (okolo 170-180 °C) klesá houževnatost o 30 i více procent. Po úpravě při teplotách nad 200 °C může klesnout rázová houževnatost na 10 % původní hodnoty neupraveného dřeva. Kubojima a kol. (2000) uvádí, že dřevo se po tepelné úpravě stává křehčí a pevnost v ohybu i rázová houževnatost jsou významně ovlivněny. Zmíněné změny mechanických vlastností zamezují použití tepelně upraveného dřeva v nosných konstrukcích. Na druhou stranu statický modul pružnosti v ohybu se do jisté míry zvyšuje a až při vyšších teplotách, při větší ztrátě hmoty, dochází k poklesu. Tudíž za určitých okolností může být využita tato vlastnost v aplikacích, kde je žádaná větší tuhost dílců a zároveň není limitem nižší rázová houževnatost. (Esteves a Pereira, 2009; Reinprecht, 2016)

4. Metodika

4.1. Příprava vzorků a organizace měření

K měření zkoumaných vlastností byly v případě smrku ztepilého i jedle bělokoré připraveny dva typy zkušebních těles. První typ o rozměrech 20x20x300 mm (šířka x výška x délka), který byl využit ke zjišťování pevnosti v ohybu a rázové houževnatosti. Odříznuté konce o délce 30 mm byly použity ke stanovení míry bobtnání a zjištění vlhkosti vzorků. Tato zkušební tělesa byla připravena ve třech sériích (referenční neupravená, upravená při 180 °C a upravená při 200 °C), každá navíc zvlášť pro přerážení a pro ohyb, jelikož se jedná o destruktivní zkoušky. Zkušební vzorky shodného pořadového čísla, ale s rozdílnou úpravou, byly nařezány z jedné latě, aby se dosáhlo co nejpodobnější stavby dřeva u všech tří těles.



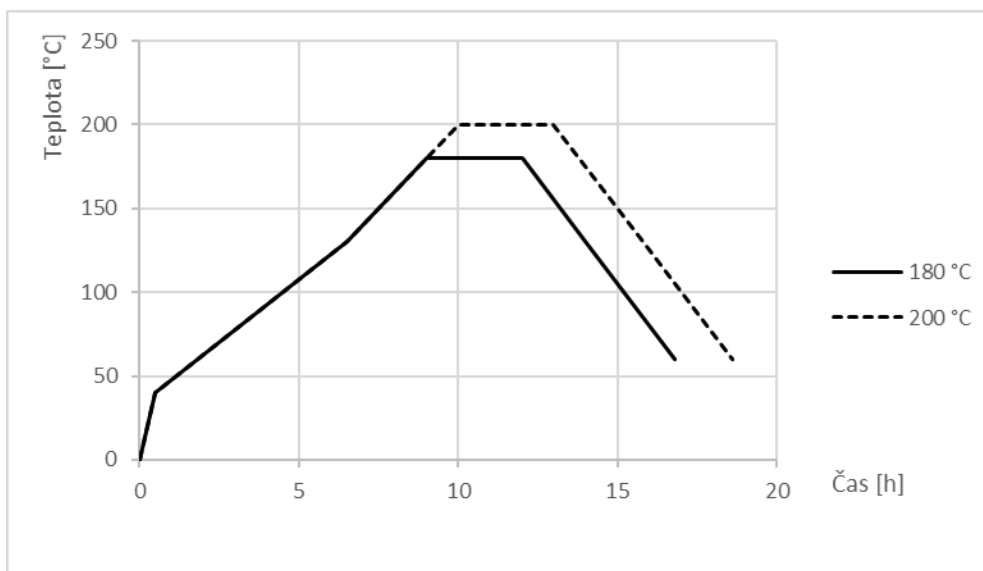
Obrázek 13: Systém pořezu vzorků 20x20x300 mm

Druhý typ zkušebních těles o rozměrech 100x20x300 mm (šířka x výška x délka) byl připraven pouze ve dvou sériích (A a B) pro každou dřevinu. Vzorky shodného označení ze série A a ze série B byly ve kmeni, ze kterého byly nařezány, umístěny přímo vedle sebe. Tím byly zajištěny co nejpodobnější vlastnosti obou vzorků. Nejprve byla všechna zkušební tělesa změřena v neupraveném stavu, jelikož se převážně jednalo o nedestruktivní zkoušky: smáčivost, drsnost, barva a tvrdost. Poslední jmenovaná zkouška má destruktivní charakter, ale je možné opakovat měření na stejném vzorku, pouze o kus vedle. Po změření neupravených vzorků byla provedena tepelná úprava – série A při 180 °C, série B při

200 °C – a poté všechny vlastnosti naměřeny znovu na shodných místech. Samozřejmě s výjimkou tvrdosti, kde byla zkouška vykonána vedle původního měřicího bodu.

4.2. Tepelná úprava vzorků

Byly zkoumány dvě úrovně tepelné úpravy: 180 °C a 200 °C, shodně pro smrk i jedli. Teploty byly zvoleny na základě zkušeností z předchozích výzkumů proběhlých na fakultě a znalostí z odborné literatury. Zkušební tělesa byla uložena několik dní před úpravou volně v místnosti, tudíž se dá usuzovat, že měla vlhkost přibližně 8-10 %. Vzhledem k velkému objemu vzorků bylo nutné provést úpravu každého stupně ve dvou várkách – nejprve testovací tělesa 100x20x300, poté 20x20x300. Úprava probíhala termokomoře S 400/03 od firmy Katres, V otvorech vyvrtaných ve vzorcích byly umístěny dvě teplotní sondy, jedna ve spodní části komory, druhá v horní části komory. Pomocí



Graf 3: Průběh tepelné úpravy

těchto sond se v průběhu úpravy zjišťuje teplota uvnitř vzorků a následně se provádějí případné úpravy nastavení komory. Průběh úpravy je vidět na grafu č. 3. Počáteční ohřev na 40 °C proběhl se strmostí 80 °C/h, fáze ohřevu na 130 °C měla strmost 15 °C/h, trvala tedy 6 hodin. Finální část ohřevu na cílovou teplotu proběhla se strmostí 20 °C/h, tedy pro 180 °C trvala 2,5 hodiny, pro 200 °C trvala 3,5 hodiny. Trvání fáze úpravy trvalo shodně pro obě úrovně úpravy, a to 3 hodiny. Poté začalo ochlazování se strmostí 25 °C/h, kdy po 2 hodinách (stupeň úpravy 180 °C), respektive 2,8 hodinách (stupeň úpravy 200 °C), byla přidána vodní pára k opětovnému zvlhčení dřeva.

4.3. Měření

Měření hodnot zkoumaných vlastností probíhalo v období listopad 2019 – červen 2020 v laboratořích FLD ČZU. Zkušební tělesa byla vždy klimatizována v klimatizačních komorách při 20 °C a 65% relativní vzdušné vlhkosti, což by mělo znamenat 12% absolutní vlhkost pro neupravené dřevo.

Rozměry byly stanoveny s přesností 0,01 mm pomocí digitálního posuvného měřítka Kinex 6040-27-150 s propojením do počítače. Hmotnost byla zvážena na digitálních váhách KERN PCB 2500-2 s přesností 0,01 g a rovněž s propojením do počítače.

4.3.1. Stanovení hustoty

Stanovení hustoty proběhlo v souladu s normou ČSN 49 0108. Hmotnost v gramech zjištěná vážením se dělí objemem zjištěným měřením rozměrů zkušební tělesa. Jelikož se hustota dřeva mění se změnou jeho vlhkosti, bylo provedeno při podmínkách zmíněných v kapitole 4.3 Měření. Zjišťování vlhkosti je popsáno v samostatné podkapitole. Následný výpočet probíhá dle následujícího vzorce

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$$

m_w – hmotnost vzorku při dané vlhkosti [g]

V_w – objem vzorku při dané vlhkosti [cm³]

Výsledky byly dle normy zaokrouhleny na 0,005 g.cm⁻³.

4.3.2. Stanovení barvy

K měření barvy byl použit spektrofotometr Konica Minolta CM-600d pracující v trichromatické soustavě CIELab – dle normy ČSN EN ISO 11664-4. Nastavení přístroje bylo následující: D65 illuminant, observer angle 10°, **Color index 8° gloss**, metoda SCI. Na každém vzorku byla provedena měření na třech různých místech, výsledná hodnota každého z nich byla stanovena zprůměrováním tří po sobě jdoucích měření na daném měřicím bodu.

Při zjišťování barvy po tepelné úpravě byla využita shodná místa, která byla přesně vyznačena před měřením vzorků v neupraveném stavu. Výsledky v hodnotách L*, a*, b* byly následně porovnány.



Obrázek 14: Spektrofotometr Konica Minolta CM-600d

4.3.3. Stanovení vlhkosti

Stanovení vlhkosti proběhlo v souladu s normou ČSN 49 0103. Metoda spočívá v opakovaném vážení. Nejprve byla zkušební tělesa zvážena v rovnovážně vlhkém stavu a hmotnost zaznamenána. Poté byly vzorky vysušeny při teplotě 103 ± 2 °C do absolutně suchého stavu a následně zváženy. Nebyly použity váženky ani exsikátory, nicméně vážení probíhalo v řádu nižších desítek vteřin po vyjmutí z klimatizační komory, respektive sušárny. Výpočtem byla zjištěna vlhkost dřeva při měření. Absolutní vlhkost dřeva se vypočítá dle vztahu

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%]$$

m_w – hmotnost dřeva před vysušením [g]

m_0 – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu [g]

Dle normy byly výsledky zaokrouhleny na celá procenta.

4.3.4. Stanovení drsnosti

Stanovení drsnosti proběhlo v rámci normy ČSN EN ISO 4287 pomocí konfokálního laserového mikroskopu Olympus OLS 40-SU, přičemž byl použit objektiv MPlanApo N 50x. Parametry měření byly nastaveny následovně: celková délka měření 11,6 mm, $\delta c = 0,800$ mm, počet úseků: 12, pre/post travel 1,000 mm. Na získaný profilograf byla aplikována korekce sklonu a následně vypočítány parametry drsnosti. Zaznamenávány byly následující parametry: Rz – největší výška profilu, Rc – průměrná výška prvků profilu, Ra – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu a RSm – průměrná šířka prvků profilu. Na každém vzorku byla drsnost měřena jednou v neupraveném stavu, jednou v upraveném stavu. Opět byla vyznačena měřicí zóna, která zajistila měření na co nejvíce podobném místě.

4.3.5. Stanovení smáčivosti

Stanovení smáčivosti bylo provedeno metodou měření na přisedlé kapce pomocí přístroje Krüss DSA30E. Kapka vody o objemu 5 μ l byla pomocí přístroje umístěna na zkušební těleso a po 5 vteřinách kontaktu kapky a tělesa byly odečteny kontaktní úhly. Zaznamenán byl aritmetický průměr obou úhlů. Měření bylo provedeno na třech místech každého zkušebního tělesa, opakování měření (po tepelné úpravě) bylo provedeno na shodných místech.



Obrázek 15: Přístroj Krüss DSA30E k měření smáčivosti

4.3.6. Stanovení bobtnání

Proces stanovení bobtnání je popsán v normě ČSN 49 0126. Konce vzorků ke zjišťování pevnosti v ohybu, respektive houževnatosti, byly odříznuty a byly použity ke stanovení bobtnání. První měření rozměrů (radiálního, tangenciálního a axiálního) proběhlo po vysušení do absolutně suchého stavu. Poté byla zkušební tělesa ponořena do vody a po ustálení rozměrů proběhlo měření rozměrů při vlhkosti vzorků nad bodem nasycení vláken. Výpočet bobtnání v jednotlivých směrech je dle následujícího vzorce

$$\alpha_{x \max} = \frac{l_{x \max} - l_{x \min}}{l_{x \min}} \cdot 100 [\%]$$

kde

$\alpha_{x \max}$ je maximální bobtnání v procentech v daném směru

(radiálním/tangenciálním/axiálním)

$l_{x \max}$ je rozměr při maximálním nabobtnání, tedy nad mezí nasycení vláken, pro daný směr

$l_{x \min}$ je rozměr pro daný směr v absolutně suchém stavu.

Výpočet objemového bobtnání byl proveden podle následujícího vzorce

$$\alpha_{V \max} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\min}} \cdot 100 [\%]$$

kde

$\alpha_{V \max}$ je maximální objemové bobtnání vyjádřené v procentech

V_{\max} je objem zkušební tělesa při vlhkosti nad mezí nasycení vláken

V_{\min} je objem zkušební tělesa v absolutně suchém stavu

4.3.7. Stanovení pevnosti v ohybu a statického modulu pružnosti

Pevnost v ohybu byla zjišťována dle normy ČSN 49 0115. Měření probíhalo na trhacím stroji TIRA test 2850S E58, při zatěžování konstantní rychlostí posunu zatěžovací hlavy, která činila 3,5-10 mm.min⁻¹ v závislosti na dřevině a stupni úpravy. Zkouška byla ukončena při poklesu zatěžovací síly o 10 % v porovnání s maximem v rámci daného vzorku. Výpočet pevnosti v ohybu byl proveden dle vzorce

Pevnost v ohybu

$$\sigma_w = \frac{3 \cdot F_{\max} \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa]$$

F_{\max} – maximální zatížení [N]

l – vzdálenost mezi podpěrami [mm]

b – šířka zkoušeného tělesa [mm]

h – výška zkoušeného tělesa

Zjištěné výsledky byly zaokrouhleny na 1 MPa.



Obrázek 16: UTS Tira v konfiguraci pro třibodový ohyb

Současně se zjištěním pevnosti v ohybu byl zjištěn také statický modul pružnosti. Kvůli tomu se měření odchýlilo od znění normy ČSN 49 0116, která předepisuje zařízení pro čistý ohyb se dvěma podpěrami a dvěma tlačnými trny. Modul pružnosti byl stanoven dle vzorce

$$E = \frac{\Delta F \cdot l^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta y}$$

kde

ΔF je rozdíl sil z 10 % a 40 % maximální zatěžovací síly [N]

l je vzdálenost mezi podpěrami [mm]

b je šířka testovaného vzorku [mm]

h je výška testovaného vzorku [mm]

Δy je rozdíl průhybu při 10 % a 40 % maximálního zatížení [mm]

Výsledky byly zaokrouhleny na 0,1 GPa.

4.3.8. Stanovení houževnatosti

Houževnatost (přerážecí práce) byla stanovena dle normy ČSN 49 0117. Zkušební tělesa byla připravena dle normy. Změnou oproti normě byla přítomnost některých zkušebních těles s poloradiálními plochami, jež byla vynucena množstvím materiálu dostupného k testování. Po změření radiálního a tangenciálního rozměru zkušebního tělesa v místě přerážení bylo těleso uloženo na podpěry radiální plochou jako úderovou plochou, tedy na tangenciální ohyb. Dynamické zatížení bylo zajištěno kyvadlovým kladivem s energií 50 J. Práce spotřebovaná k přerážení vzorku byla odečtena s přesností na 1 J. Výsledná rázová houževnatost se vypočítá dle vztahu

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

W – práce spotřebovaná na přerážení tělesa [J]

b, h – radiální a tangenciální rozměr tělesa v místě přerážení [mm]

Výsledky byly zaokrouhleny na 0,1 J.cm⁻².



Obrázek 19: Charpyho kladivo v připravené pozici

4.3.9. Stanovení tvrdosti

Brinellova metoda použitá v této práci je popsána v normě ČSN EN 1534. Zkouška spočívá v zatlačení ocelové kulové plochy s průměrem 10 mm danou silou a poté se zkoumá velikost důlku vytvořeného kulovou plochou. Výsledná tvrdost se spočítá dle následujícího vzorce

$$H_B = \frac{2 \cdot F}{g - \pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} [MPa]$$

F – síla působící na kulovou plochu [N]

D – průměr kulové plochy [mm]

d – průměr důlku vytvořeného ve dřevě [mm]

g – tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

Při všech měřeních byla použita síla 250 N, což byla nejnižší síla dostupná na měřicím přístroji. I přesto v některých případech nebyly výsledky validní a měření se muselo opakovat na podobném místě. Na každém testovaném vzorku byla tvrdost změřena ve třech bodech, rovnoměrně rozmístěných po celé ploše. Při druhém měření, po tepelné úpravě, byla měření provedena co nejbližší k bodu původního měření, ne však blíže než 20 mm od okraje důlku. Zároveň bylo voleno místo s co nejpodobnější stavbou dřeva, aby výsledky porovnání byly co nejprůkaznější.

Tvrdoměr typu Struers Duravision-30 vypisuje přímo hodnotu v $kg \cdot cm^{-2}$, kterou je potřeba vynásobit tíhovým zrychlením, aby vyšel výsledek dle Brinella v MPa.

4.3.10. Statistické zpracování dat

Ke kvantitativnímu posouzení vlivu druhu dřeviny a teploty úpravy na měřené hodnoty byla použita dvou-faktorová analýza rozptylu (ANOVA). Tato metoda testuje, zda je vliv dvou posuzovaných faktorů (dřevina a teplota) na výsledné hodnoty statisticky významný. Kromě vlivu těchto faktorů samostatně je vypočítána i jejich interakce. Pokud je tento interakční efekt statisticky významný, vliv jednotlivých faktorů na naměřenou hodnotu se nescítá. Místo toho se míra tohoto vlivu výrazně liší u různých kombinací dřeviny a teploty úpravy.

ANOVA dokáže pouze určit, zda mají dané faktory nějaký vliv na výslednou hodnotu. Pro zjištění velikosti nebo povahy tohoto efektu je třeba využít následné (post-

hoc) testy. Protože počty vzorků byly téměř shodné, Tukeyho test byl vhodný pro analýzu každé z kombinací dřeviny a teploty. Tukeyho test umožňuje posoudit, zda je rozdíl dané skupiny od globálního průměru statisticky významný, a ukazuje velikost tohoto rozdílu. K provedení statistických vyhodnocení bylo využito programovacího jazyka Python.

Pro všechny tyto testy byla použita hladina významnosti $p = 0,05$, která je běžným standardem napříč vědeckými odvětvími. Počet měření byl více než minimální potřebný počet – 30.

Ke grafickému znázornění bylo využito krabicových grafů. Obdélník je ohraničen prvním a třetím kvantilem, tlustá čára uvnitř obdélníku značí medián. Vousy vystupující z obdélníku poté značí nejvyšší a nejnižší hodnoty, s výjimkou odlehlých hodnot (outlier), které jsou znázorněny malými kroužky.

S výjimkou barevné změny ΔE , kde uvádění referenční hodnoty nedává smysl, jsou dvě teploty úpravy, 180 °C a 200 °C, porovnávány s neupraveným dřevem, které je označováno jako Ref. (referenční).

5. Výsledky a diskuze

Na následujících stranách jsou zobrazeny výsledky statistického zpracování naměřených hodnot. Souhrnná tabulka s procentuálními změnami jednotlivých sledovaných vlastností dává základní přehled o trendech v souvislosti s úpravou. Následuje rozbor jednotlivých vlastností s krabicovými grafy znázorňujícími výstupy z ANOVY obsahující komentáře s důležitými číselnými údaji ze základní statistiky. Je také doplněn porovnáním s hodnotami v dostupné literatuře a pokusem o vysvětlení pozorovaných skutečností. Kapitulu uzavírá souhrnná tabulka se základní statistikou – aritmetickým průměrem, směrodatnou odchylkou, variačním koeficientem, minimem a maximem k porovnání absolutních čísel jednotlivých vlastností pro každý stupeň úpravy, respektive dřevinu.

Tabulka 3: Přehled procentuálních změn sledovaných vlastností

	Jedle 180 °C	Jedle 200 °C	Smrk 180 °C	Smrk 200 °C
Hustota	-3,7 %	-5,4 %	-3,3 %	-5,5 %
Smáčivost - kontaktní úhel	133,0 %	140,9 %	73,6 %	71,6 %
Světlost	-35,8 %	-57,8 %	-32,7 %	-55,2 %
Celková barevná změna [-]	31,37	48,13	30,83	47,54
Drsnost - Ra	-6,9 %	-1,6 %	-0,3 %	-3,5 %
Drsnost - Rc	5,8 %	-1,0 %	-4,2 %	-4,9 %
Drsnost - Rz	-8,0 %	1,9 %	4,0 %	2,9 %
Drsnost - Rsm	-0,7 %	0,0 %	-1,7 %	-1,8 %
Pevnost v ohybu	-1,2 %	-29,3 %	-6,1 %	-24,1 %
Rázová houževnatost	-21,6 %	-56,6 %	-24,4 %	-44,6 %
Tvrdość dle Brinella	20,1 %	17,0 %	21,4 %	13,2 %
Statický modul pružnosti	2,9 %	-1,1 %	5,8 %	2,6 %
Bobtnání radiální	-10,3 %	-26,2 %	-26,2 %	-30,2 %
Bobtnání tangenciální	-9,4 %	-24,4 %	-14,4 %	-33,3 %
Bobtnání axiální	-24,9 %	-53,2 %	-35,2 %	-62,7 %
Bobtnání objemové	-10,8 %	-27,0 %	-14,3 %	-34,1 %

Při vyhodnocování výsledků se především posuzoval vliv úpravy na sledované vlastnosti v rámci dřeviny a interakce vlivu úpravy dohromady s dřevinou, tedy zda tepelná úprava mění některé vlastnosti významně více u dřeva jedné dřeviny než u druhé. Tato skutečnost nastala pouze u dvou sledovaných vlastností – smáčivosti a bobtnání. Ostatní

vlastnosti zůstaly bez významné změny nebo sledovaly podobný trend – jak smrk, tak jedle.

K adekvátnímu porovnání hodnot je třeba znát i vlhkost. Referenční vzorky nabyly klimatizací při 65% relativní vlhkosti vzduchu a 20 °C absolutní vlhkost ve výši 12,8 %, respektive 13,0 % pro smrk, respektive jedli. Absolutní vlhkost zkušebních těles série upravené při 180 °C byla 10,0 % pro smrk, 10,2 % pro jedli. Zkušební tělesa série upravené při 200 °C dosáhla vlhkosti 7,4 % pro smrk, 7,2 % pro jedli.

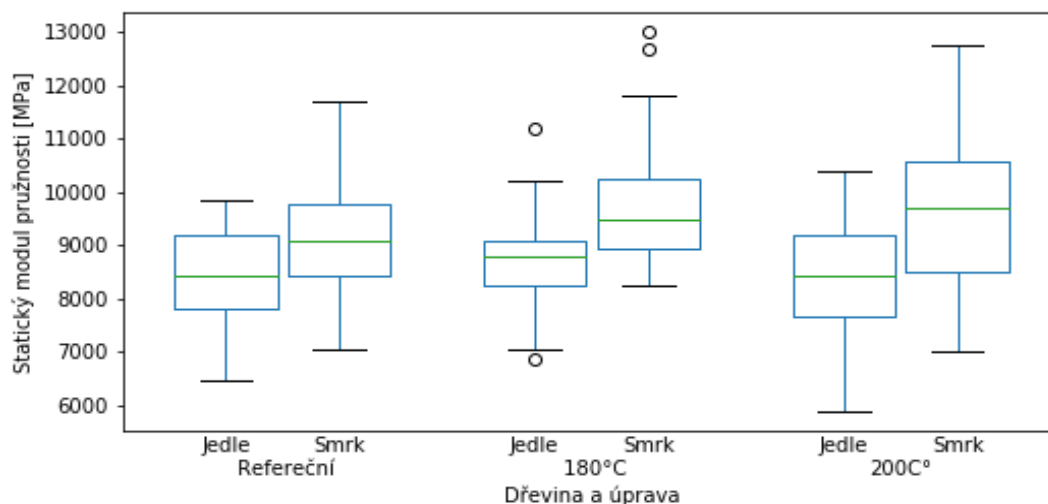
5.1. Hustota

Hodnoty hustoty obou dřevin mírně klesly, přičemž po úpravě při 200 °C byla hustota nižší než po úpravě při 180 °C. Tyto výsledky korespondují s údaji z Termowood handbook (ITA, 2003), Reinprecht (2011) zmiňuje podobný trend a Kubojima a kol. (2000) při teplotě úpravy 160 °C udává mírné snížení hustoty, které přibývá s délkou doby úpravy. I přes to, že je změna malá, přibližně 3,5-% snížení u úpravy při 180 °C a 5,5-% snížení u úpravy při 200 °C, ANOVA i Tukeyho test vyhodnocují tyto změny jako statisticky významné.

5.2. Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti vykazuje vývoj doposud pozorovaný v jiných pracích, například Kubojima a kol. (2000). Nejprve mírný nárůst, poté pokles. Nicméně jsou to změny v řádu nižších jednotek, které nejsou statisticky významné ($p = 0,08$). V případě jedle je u série upravené na 200 °C pokles o 1,1 % oproti referenční hodnotě, smrk si drží vyšší statický modul pružnosti i na této úrovni úpravy – o 2,6 % vyšší než u referenční série. Rozdíl je ale ve dřevině, již neupravená referenční série vykazuje statisticky významný rozdíl. Průměrná hodnota pro jedli je 8454 MPa, pro smrk 9252 MPa. Což je zajímavé, protože Požgaj a kol. (1997) uvádí opačný rozdíl: smrk 8 210 MPa, jedle 8 948 MPa. Wood handbook (2010) uvádí hodnoty pro americké druhy smrků od 10 000 po 11 200 MPa, hodnoty pro jedle od 9 600 po 11 300 MPa. Li Shi a kol. (2007) ve své práci uvádí pro změnu modulu pružnosti rozdílné poznatky. Smrk i jedle byly upravované postupem Thermowood při 212 °C (smrk) a 202 °C (jedle), obojí se shodně dlouhou dobou hlavní fáze úpravy, 3 hodiny, ale rozdílným trváním ostatních fází. Smrk s počátečním

modulem pružnosti 9 730 MPa doznal snížení po úpravě o 14 %, respektive o 7 %, podle zvoleného postupu. Počáteční modul pružnosti jedle 7 410 MPa se naopak zvýšil o 25 %, respektive o 17 %. Tyto rozdíly se dají přisoudit rozdílným druhům, jelikož práce je z Kanady a nejbližší specifikace je daná tím, že dřevo bylo koupeno v lokálním obchodě, a tak se dá soudit, že jde o druhy Severní Ameriky.



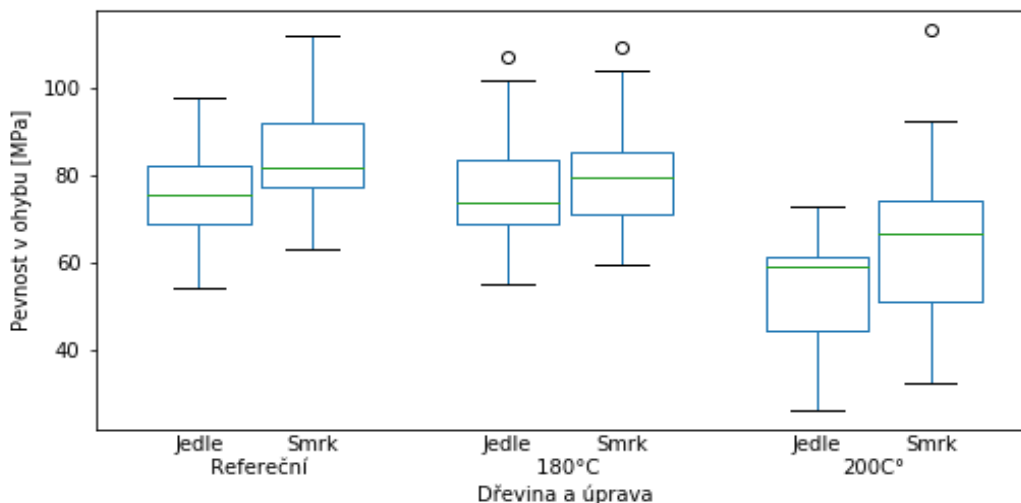
Graf 5: Statický modul pružnosti v ohybu

Kačíková a kol. (2013) uvádí, že modul pružnosti smrku ztepilého upraveného při 187 °C, respektive 221 °C, po dobu 90 minut za přístupu vzduchu se snížil o 9 %, respektive o 25 %. Hodnota pro neupravené dřevo je 8 140 MPa.

5.3. Pevnost v ohybu

Ani pevnost v ohybu nepřináší hodnoty mimo očekávané meze. P hodnota pro faktor dřeviny i úpravy se blíží nule, tudíž jsou oba faktory významné. Nicméně se hodí bližší prozkoumání na základě Tukeyho testu. Po úpravě při 180 °C poklesla pevnost v ohybu pouze nevýznamně – o 1,2 % pro jedli, o 6,1 % pro smrku. Významný pokles nastal až po úpravě při 200 °C, kdy naopak jedle ztratila více, než smrku s poklesem o 29,3 % oproti smrku s poklesem 24,1 %. Zmíněná statistická významnost faktoru dřeviny je dobře vidět na absolutních číslech pevnosti v ohybu. Smrku má celou dobu vyšší hodnoty pevnosti než jedle, což dle Požgaje a kol. (1997) souhlasí. Pro neupravené dřevo má uvedený přibližně stejný rozdíl, byť o něco nižší. To je ale způsobeno vyšší vlhkostí vzorků, cca 17 %.

Kubojima a kol. (2000) reportoval nejprve zvýšení pevnosti v ohybu a až poté pokles, nicméně teplota úpravy byla 160 °C.



Graf 5: Pevnost ve statickém ohybu

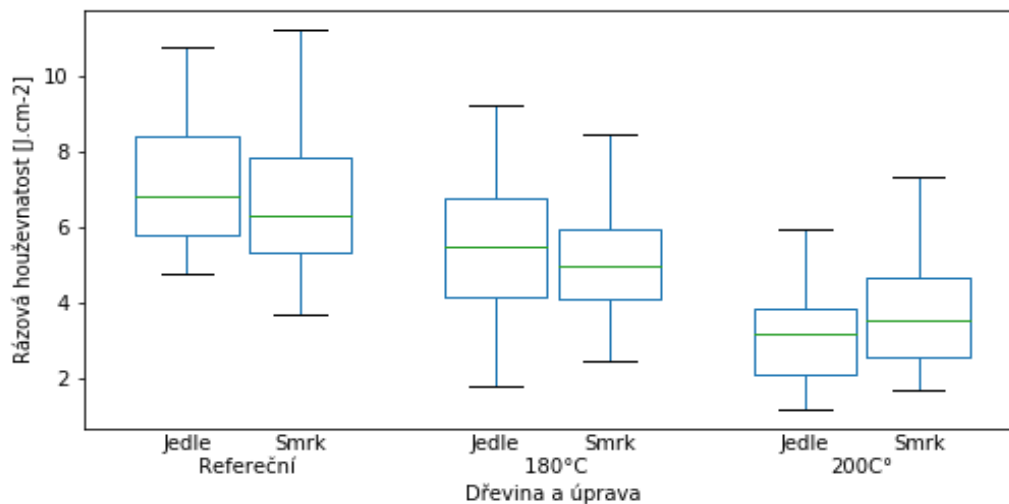
Zajímavější je porovnání s hodnotami Li Shi a kol. (2007), který uvádí významný rozdíl vlivu úpravy na pevnost v ohybu u těchto dřevin. Postupem popsaným v **předchozí podkapitole** došel k následujícím výsledkům: smrku o počáteční $\sigma = 75,2$ MPa se po úpravě snížila pevnost o 49 %, respektive 34 % u druhé skupiny vzorků, zatímco u jedle o počáteční $\sigma = 61$ MPa nedošlo k žádnému snížení. Příčinou tak výrazného rozdílu může být opět rozdílná teplota úpravy a rozdílné druhy rostoucí v Severní Americe.

Kačíková a kol. (2013) uvádí, že pevnost v ohybu smrku ztepilého upraveného při 187 °C, respektive 221 °C, po dobu 90 minut za přístupu vzduchu se snížila o 24 %, respektive o 46 %. Pokles u první zmíněné teploty úpravy je tedy srovnatelný s hodnotami získanými úpravou při 200 °C.

5.4. Houževnatost

Očekávané snížení rázové houževnatosti bylo potvrzeno: Pokles u jedle o 21,6 % u úpravy při 180 °C, respektive 56,6 % při úpravě při 200 °C, u smrku první stupeň úpravy snížil hodnotu houževnatosti o 24,4 %, druhý pak o 44,6 %. Jasnou statistickou významnost dokládá i p hodnota pro faktor úpravy, kterou můžeme pokládat za nulovou. Z výsledků Tukeyho testu je vidět, že i jednotlivé části mají mezi sebou statisticky významný rozdíl.

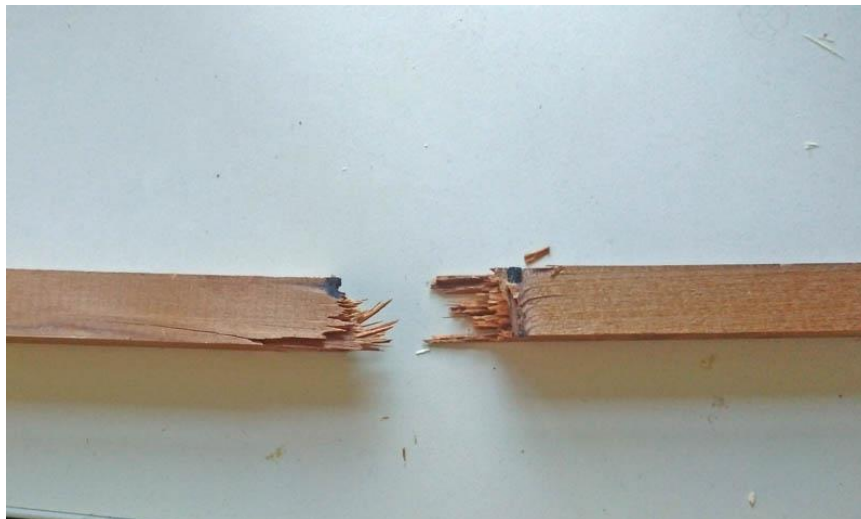
Dá se zde poměrně dobře demonstrovat rozdíl mezi dřevem jehličnatých a listnatých druhů. Bříze bělokoré klesla rázová houževnatost o 40 % již při úpravě na 165 °C. (Kanát, 2017)



Graf 6: Rázová houževnatost

Literatura není příliš obsáhlá na výsledky rázové houževnatosti. Thermowood handbook (ITA, 2003) udává pouze jednu číselnou hodnotu: došlo ke snížení houževnatosti smrkového dřeva o 25 % po úpravě při 220 °C po dobu 3 hodin. Tato hodnota je výrazně rozdílná od hodnot získaných v této práci – snížení o 44 % při teplotě 200 °C. Kol (2010) uvádí výsledky pro turecký druh jedle – *Abies bornmülleriana*. Po úpravě procesem Thermowood při teplotě 190 °C po dobu dvou hodin došlo ke snížení rázové houževnatosti o 10,5 %. Nicméně se opět jedná o porovnání s jiným druhem a o třetinu kratší dobu úpravy. Boonstra a kol. (2007) upravoval smrk ztepilý dvoustupňovým procesem, který zahrnoval fázi úpravy v atmosféře vodní páry a přetlaku při 165 °C dlouhou 30 minut, po které následovala fáze úpravy v atmosféře přehřáté páry nebo dusíku při atmosférickém tlaku a 180 °C trvající 6 hodin. Došlo k poklesu rázové houževnatosti z 5,2 J.cm⁻² na 2,1 J.cm⁻², je to tedy pokles o 60 %.

Z uvedených výsledků je vidět, že rázová houževnatost je hlavní limitující faktor pro použití termodřeva v aplikacích náročných na mechanické vlastnosti, pokud je pravděpodobnost i menšího zatížení rázovým ohybem.



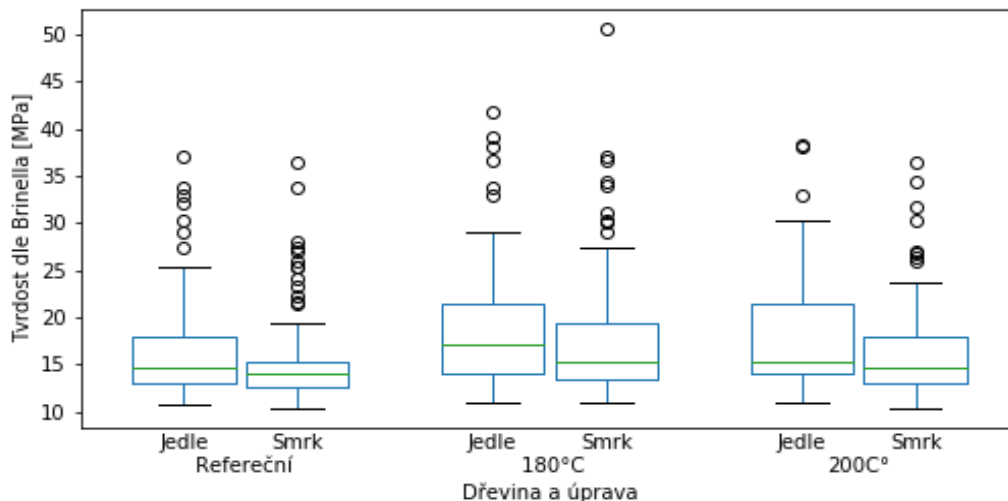
Obrázek 20: Příklad lomu po zkoušce na rázovou houževnatost, jedle upravená při 200 °C

5.5. Tvrdost

Tvrdost se dle očekávání při prvním stupni úpravy na 180 °C nejprve zvyšuje (o 20,1 % u jedle, respektive o 21,4 % u smrku), nicméně po úpravě při 200 °C se další zvětšení tvrdosti neobjevilo, naopak mírně pokleslo – o 17,0 % větší tvrdost v porovnání s referenční hodnotou u jedle, o 13,2 % u smrku. To dokládají i výsledky ANOVY, kde se p hodnota pro faktor úpravy blíží nule. ANOVA také ukazuje na rozdíl mezi jednotlivými dřevinami – p hodnota 0,01. Snížení tvrdosti při druhém stupni úpravy se dá vysvětlit přílišným poklesem hustoty – tvrdost dřeva je závislá na hustotě. (Tsoumis, 1991) Při prvním stupni převýšily výhody úpravy ztrátu hustoty, ale při druhém stupni bylo snížení hustoty větší než přírůstek tvrdosti vlivem úpravy.

Na grafu lze vidět poměrně velký počet odlehlých hodnot směrem k větší tvrdosti. To je zapříčiněno heterogenní stavbou dřeva. Měřicí body byly kresleny vždy do stejných míst v rámci vzorku (s výjimkou suků), a tudíž některá místa byla přímo na zóně letního dřeva. Z grafu ale není vidět jiný faktor, který částečně ovlivnil výsledky. V některých případech, zejména u úpravy při 200 °C, nešlo provést měření z důvodu přílišné zatěžující síly. S touto skutečností nešlo nic dělat, jelikož nebyla k dispozici nižší zatěžovací síla. Je pravděpodobné, že chybná měření měla ve skutečnosti hodnotu v rozmezí cca 8-10 MPa, a

tak jejich absencí jsou data mírně zkreslena. Nicméně se nejedná o významné zkreslení, chybných měření nebyl výrazný počet.



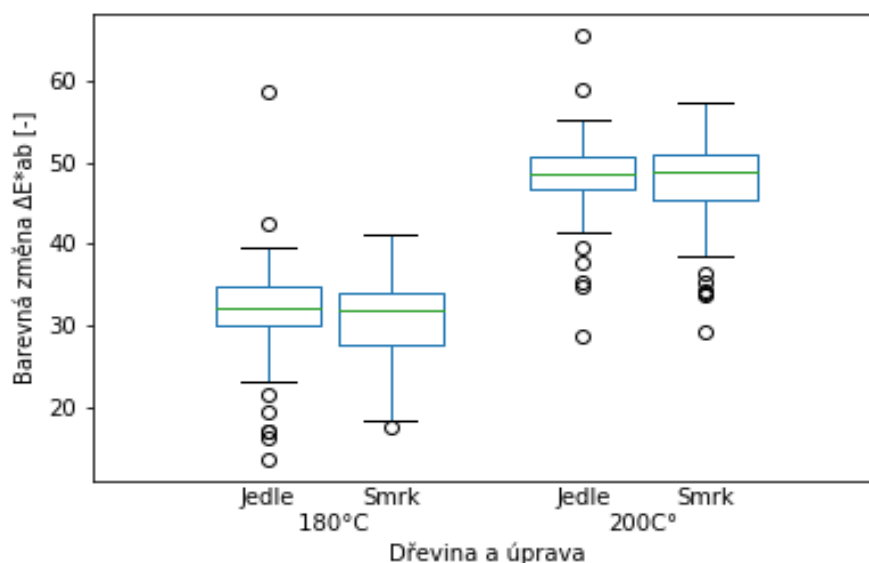
Graf 7: Tvrdost

Li Shi a kol. (2007) ve své práci stanovoval tvrdost pomocí Jankovy metody, tudíž nejde přímo porovnávat, nicméně trend souhlasí – tvrdost se oproti neupravenému dřevu zvýšila. Rozdíl je v míře přírůstku tvrdosti. U smrku vykazuje pouze o 7 %, respektive 3 % vyšší tvrdost, u jedle o 4 %, respektive 19 %.

5.6. Barva

Změnu barvy bylo možné vidět už pouhým okem, navíc u této hodnoty nebyly očekávány žádné netypické výsledky. P hodnota ANOVY pro vliv úpravy na světlost je rovna nule, což dokládá výraznou změnu, stejně tak je rozdílná barva smrku a jedle v rámci každého stupně úpravy. To, že se barva měnila ve stejné míře pro obě dřeviny, jasně ukazuje ΔE^*_{ab} – barevná změna. P hodnota z ANOVY pro vliv dřeviny je výrazně mimo statistickou významnost (0,42), tím více následný Tukeyho test ukazuje s hodnotou $p = 0,9$ pro dvojice 180JD – 180SM a 200JD – 200SM na téměř shodné barevné změny.

Zajímavé byly některé anomálie, kdy vzorky (ať už jedle či smrku) upravené při 200 °C měly téměř shodnou barvu jako vzorky upravené při 180 °C. Toto bylo ale očividně způsobeno nedostatečným prohřátím kvůli nedokonalému založení vzorků do termokomory, jelikož bylo vidět, že tmavé konce o stejné barvě, jako měly ostatní vzorky, končily náhle v místě prokladu. Z toho vyplývá nutnost dbát vysoké pozornosti při zakládání dřeva do termokomory a správně navrhnout rozložení a zaplnění za účelem co nejlepšího proudění ohřevného média.



Graf 8: Celková barevná změna

Kačíková a kol. (2013) uvádí barevnou změnu ΔE^*_{ab} smrku ztepilého upraveného při 187 °C, respektive 221 °C, po dobu 90 minut za přístupu vzduchu ve výši 16,94, respektive 42,43. Hodnoty naměřené v této práci byly pro smrk 30,84 (180 °C) a 47,54 (200 °C). Podobné změny naměřili i Srinivas a Pandey (2012) na dřevě kaučukovníku (*Hevea brasiliensis*) při teplotách 210 – 240 °C. Termowood handbook (ITA, 2003) ukazuje podobný trend pro pokles světlosti (L^*). Z těchto dat vyplývá, že barva smrku a jedle ztmavla více, než bělové dřevo u reportované borovice: pokles z cca $L^* = 85$ na cca $L^* = 68$ při 180 °C, respektive cca $L^* = 55$ při 200 °C.

5.7. Drsnost

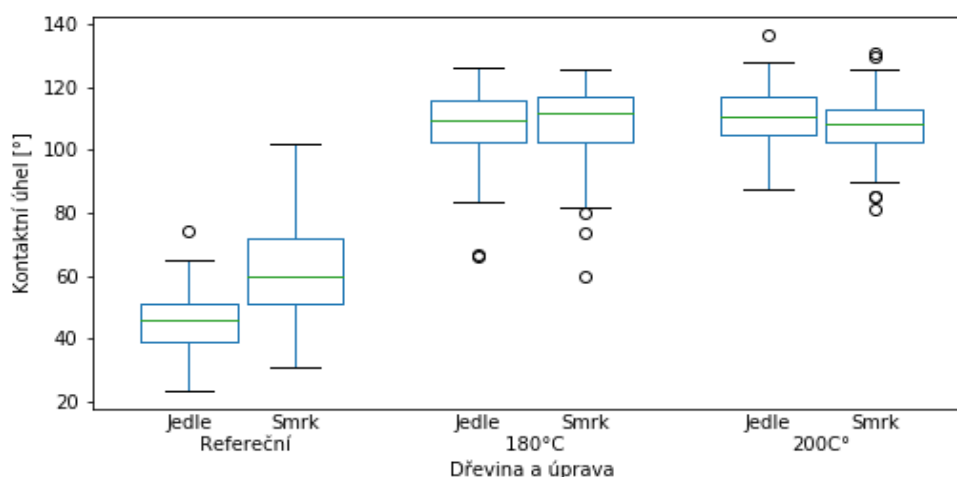
Změny drsnosti nevykazují žádný trend ani statisticky významný rozdíl. Změny drsnosti dřeva jednotlivých dřevin po úpravě jsou v řádu desetin až jednotek procent,

přičemž změny jdou do kladných i záporných čísel, někdy i v rámci jedné dřeviny a stupně úpravy. Podobné závěry lze sledovat i v práci Dudíka a kol. (2020), kde nebyl nalezen žádný negativní trend změny drsnosti březové dýhy po tepelné úpravě.

Zároveň měření vykazovala poměrně velkou míru variability – lze pozorovat na směrodatné odchylce nebo variačním koeficientu. To je pravděpodobně dáno kombinací heterogenity dřeva a charakterem liniového měření drsnosti. V některých případech bylo měřeno na letním dřevě, v některých na jarním dřevě, případně na různých kombinacích.

5.8. Smáčivost – kontaktní úhel

Smáčivost je s bobtnáním v tangenciálním směru a objemovým bobtnáním jediná pozorovaná vlastnost, u které byl pozorován statisticky významný vliv úpravy a dřeviny zároveň. Na grafu je vidět významně rozdílnou smáčivost reprezentovanou kontaktním úhlem neupravené jedle a smrku (p hodnota Tukeyho testu 0,001) a následné vyrovnání hodnot pro obě dřeviny při úpravě na 180 °C (p hodnota 0,9). Důvodem může být pryskyřice v neupraveném dřevě smrku v porovnání s jedlí, přičemž pryskyřice se ze dřeva uvolní již při prvním stupni úpravy, a tudíž již nedělá rozdíl. S výjimkou pryskyřičných kanálků je dřevo smrku a jedle velice podobné, a tak se dá přepokládat, že chemické a strukturální změny budou podobné. Drsnost obou dřevin je téměř shodná, tudíž tento faktor by neměl hrát roli.

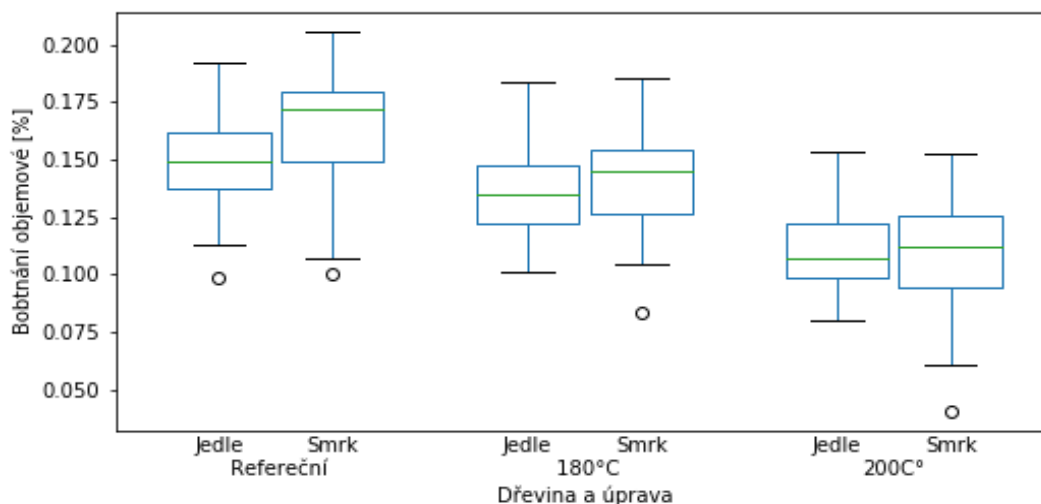


Graf 9: Smáčivost – kontaktní úhel

Dále je vidět, že úpravou při 200 °C se již kontaktní úhel nezvětšuje. Z toho se dá usuzovat, že již při 180 °C bylo dosaženo maximální možné změny. Což není úplně překvapující, když kontaktní úhel rtuti na skle je přibližně 140 °. (Giesche, 2006) Mění se ale – snižuje – variabilita výsledků: směrodatná odchylka jedle 12,7 ° (180 °C), 9,2 ° (200 °C), smrku 13 ° (180 °C), 9,8 °C (200 °C). Zdá se tedy, že vyšší teplota upraví i rozsáhlejší anomálie ve stavbě či chemickém složení.

5.9. Bobtnání

Bobtnání je jedna z vlastností, kvůli jejichž změně, konkrétně redukci, se termická modifikace dělá. Dle literatury by mělo být bobtnání výrazně omezeno. To se také stalo – po úpravě při 200 °C bylo bobtnání omezeno až o 34 % (objemové bobtnání smrku). Ještě výraznější redukci bobtnání vykazuje axiální směr, ale tyto hodnoty je třeba brát s rezervou z důvodu obecně nízkého bobtnání v tomto směru, a tudíž malých změn k měření, kde se výrazněji projeví chyba měření. Zároveň má bobtnání v axiálním směru největší variabilitu výsledků, což také nasvědčuje nedokonalosti měření. Ke zjištění reprezentativních výsledků by bylo zapotřebí provést měření dle doporučení normy konkrétně pro axiální směr.



Graf 10: Objemové bobtnání

Ve všech směrech bylo statisticky významné snížení bobtnání v závislosti na úpravě, přičemž u tangenciálního a objemového bobtnání byl významný i faktor dřeviny, a především kombinace těchto dvou faktorů. Kromě obecného trendu snižování míry

bobtnání lze ze získaných dat pozorovat snížení počátečního rozdílu mezi jednotlivými dřevinami, kdy smrk má vyšší míru bobtnání objemového i v tangenciálním směru, až na míru statisticky nevýznamnou.

Čermák a kol. (2015) uvádí bobtnání smrkového dřeva upraveného při 180 °C v radiálním směru přibližně 3,5 %, tangenciálním směru přibližně 8 % a objemové bobtnání 12 %. U smrkového dřeva upraveného při 200 °C vykazuje nečekanou vyšší hodnotu pro radiální bobtnání, než u 180 °C – přibližně 4,5 %, tangenciální 6,5 % a objemové 12 %, tedy téměř shodně s úpravou na nižší stupeň. Při porovnání s vypočtenými hodnotami je vidět, že čísla se liší u nižšího stupně úpravy, ale u vyššího stupně úpravy vychází procenta bobtnání v příslušných směrech velice podobně.

5.10. Souhrnné zhodnocení

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že smáčivost, tangenciální bobtnání a objemové bobtnání jedle ovlivňuje tepelná úprava více než u smrku a díky tomu mizí rozdíl, který je mezi dřevinami v neupraveném stavu. Ostatní vlastnosti vykazují stejný nebo velice podobný trend u obou dřevin. Můžeme tedy konstatovat, že z hlediska tepelné úpravy můžeme s jedlí pracovat stejně jako se smrkem.

Dřevo smrku ztepilého a jedle bělokoré tepelně upravené při 180 °C 200 °C vykazuje požadované zlepšení u vlastností, které může tepelná úprava vylepšit. Zejména zlepšení rozměrové stability díky menší míře bobtnání, nižší rovnovážná vlhkost, menší smáčivost a také tmavší barva. Tepelně upravené dřevo má i své nedostatky, zejména zhoršení mechanických vlastností. Při posouzení výsledků bylo zjištěno, že kromě rázové houževnatosti, která výrazně klesla u obou dřevin již po úpravě při 180 °C – cca o 23 % u jedle i u smrku, nebylo zhoršení mechanických vlastností zásadní. Pevnost v ohybu dřeva smrku i jedle se po úpravě při 180 °C snížila jen nepatrně, k významnějšímu poklesu o 29 % u jedle a o 24 % u smrku došlo až po úpravě při 200 °C. Statický modul pružnosti v ohybu zůstal stejný, či se ještě mírně zvýšil. I přes to stále není termodřevo vhodné k použití v nosných konstrukcích, zejména tam, kde se může objevit dynamické zatížení. Nicméně například použití jedle nebo smrku upravených při 180 °C na saunové lavice je představitelné.

Tabulka 4: Souhrnná tabulka základní statistiky, následující strana

	Rázová houževnatost [J.cm ⁻²]					Tvrдость dle Brinella [Mpa]				
	\bar{x}	σ	min	max	v_x	\bar{x}	σ	min	max	v_x
Jedle Ref.	7,1	1,6	4,8	10,8	21,9%	16,2	5,0	10,7	37,0	31,0%
Jedle 180°	5,6	1,7	1,8	9,2	30,8%	19,5	7,5	11,0	41,7	38,6%
Jedle 200°	3,1	1,2	1,2	6,0	38,7%	19,0	7,4	11,0	38,3	39,0%
Smrk Ref.	6,7	1,9	3,7	11,2	28,8%	15,0	4,2	10,3	36,3	28,0%
Smrk 180°	5,1	1,6	2,5	8,5	31,4%	18,3	7,9	11,0	50,7	43,1%
Smrk 200°	3,7	1,4	1,7	7,3	38,9%	17,0	6,1	10,3	36,3	36,1%
	Pevnost v ohybu [Mpa]					Statický modul pružnosti [Mpa]				
	\bar{x}	σ	min	max	v_x	\bar{x}	σ	min	max	v_x
Jedle Ref.	76,1	9,4	54,0	97,8	12,4%	8454	831	6462	9849	9,8%
Jedle 180°	75,2	12,4	55,0	107,0	16,5%	8696	868	6861	11210	10,0%
Jedle 200°	53,8	11,8	26,2	72,7	22,0%	8357	1124	5883	10383	13,5%
Smrk Ref.	84,9	11,2	63,2	112,1	13,2%	9252	1124	7039	11703	12,1%
Smrk 180°	79,7	11,3	59,7	109,1	14,2%	9790	1222	8238	13030	12,5%
Smrk 200°	64,4	15,6	32,3	113,4	24,2%	9488	1445	7000	12750	15,2%
	Hustota [MPa]					Smáčivost - kontaktní úhel [°]				
	\bar{x}	σ	min	max	v_x	\bar{x}	σ	min	max	v_x
Jedle Ref.	0,461	0,039	0,381	0,538	8,4%	46	8	23	74	18,0%
Jedle 180°	0,444	0,037	0,372	0,518	8,4%	107	13	66	126	11,9%
Jedle 200°	0,436	0,040	0,358	0,518	9,3%	111	9	87	137	8,4%
Smrk Ref.	0,470	0,034	0,404	0,564	7,3%	63	15	31	102	23,4%
Smrk 180°	0,454	0,035	0,394	0,540	7,6%	109	13	60	126	12,0%
Smrk 200°	0,444	0,032	0,380	0,532	7,2%	107	10	81	131	9,1%
	Světlost [-]					Celková barevná změna [-]				
	\bar{x}	σ	min	max	v_x	\bar{x}	σ	min	max	v_x
Jedle Ref.	81,12	1,81	74,89	84,01	2,2%	-	-	-	-	-
Jedle 180°	52,10	6,73	21,81	67,01	12,9%	31,37	6,49	13,68	58,54	20,7%
Jedle 200°	34,20	5,43	23,44	55,74	15,9%	48,13	5,29	28,69	65,61	11,0%
Smrk Ref.	83,17	1,92	75,99	86,41	2,3%	-	-	-	-	-
Smrk 180°	55,97	6,59	43,96	72,42	11,8%	30,83	5,51	17,66	41,21	17,9%
Smrk 200°	37,25	6,99	28,01	58,90	18,8%	47,54	5,77	29,21	57,28	12,1%
	Drsnost - Ra [µm]					Drsnost - Rc [µm]				
	\bar{x}	σ	min	max	v_x	\bar{x}	σ	min	max	v_x
Jedle Ref.	3,80	1,61	1,08	9,04	42,3%	21,6	8,9	5,9	47,2	41,4%
Jedle 180°	3,54	1,31	1,10	6,69	37,1%	20,2	8,3	6,8	45,7	40,9%
Jedle 200°	3,74	1,44	1,36	7,73	38,6%	21,4	8,8	8,3	48,9	41,1%
Smrk Ref.	3,65	1,30	1,07	9,10	35,6%	21,9	8,1	3,9	55,9	37,0%
Smrk 180°	3,64	2,56	1,25	23,26	70,3%	21,0	7,7	6,0	44,1	36,8%
Smrk 200°	3,52	1,14	0,96	6,05	32,3%	20,8	6,8	5,3	40,1	32,7%
	Drsnost - Rz [µm]					Drsnost - Rsm [µm]				
	\bar{x}	σ	min	max	v_x	\bar{x}	σ	min	max	v_x
Jedle Ref.	48,4	24,0	11,5	147,5	49,5%	249	44	131	367	17,7%
Jedle 180°	44,5	19,6	16,4	110,1	44,1%	247	34	139	326	13,8%
Jedle 200°	49,3	21,2	15,3	118,6	43,0%	249	44	159	369	17,9%
Smrk Ref.	50,6	20,6	14,2	126,6	40,7%	251	43	122	384	17,1%
Smrk 180°	52,6	24,5	10,2	126,8	46,6%	247	41	107	337	16,6%
Smrk 200°	52,0	17,1	9,5	108,0	32,8%	247	47	148	347	19,2%
	Bobtnání rd [%]					Bobtnání tg [%]				
	\bar{x}	σ	min	max	v_x	\bar{x}	σ	min	max	v_x
Jedle Ref.	5,8%	1,2%	3,1%	8,9%	21,5%	8,2%	1,4%	5,8%	11,8%	16,9%
Jedle 180°	5,2%	1,2%	3,5%	7,8%	23,2%	7,4%	1,2%	4,7%	10,3%	16,5%
Jedle 200°	4,3%	0,9%	2,6%	6,0%	20,5%	6,2%	1,1%	4,2%	8,4%	17,5%
Smrk Ref.	6,2%	1,6%	2,6%	9,8%	25,8%	9,0%	1,5%	6,1%	12,4%	16,6%
Smrk 180°	5,5%	1,2%	2,7%	8,3%	21,7%	7,7%	1,2%	5,0%	10,1%	15,8%
Smrk 200°	4,3%	1,0%	1,6%	6,3%	23,6%	6,0%	1,5%	1,6%	9,1%	25,0%
	Bobtnání ax [%]					Bobtnání objemové [%]				
	\bar{x}	σ	min	max	v_x	\bar{x}	σ	min	max	v_x
Jedle Ref.	0,6%	0,2%	-0,2%	0,9%	40,9%	15,1%	1,9%	9,9%	19,2%	12,5%
Jedle 180°	0,4%	0,3%	-0,1%	1,9%	66,5%	13,5%	1,9%	10,1%	18,3%	13,9%
Jedle 200°	0,3%	0,3%	-0,8%	0,8%	95,6%	11,0%	1,6%	8,0%	15,3%	14,3%
Smrk Ref.	0,6%	0,2%	0,1%	1,1%	38,3%	16,5%	2,3%	10,1%	20,6%	14,1%
Smrk 180°	0,4%	0,3%	-0,9%	0,8%	70,4%	14,1%	2,0%	8,3%	18,5%	14,1%
Smrk 200°	0,2%	0,3%	-0,7%	1,3%	148,1%	10,9%	2,2%	4,1%	15,2%	20,7%

6. Závěr

V této práci byl posuzován smrk ztepilý a jedle bělokorá a změny fyzikálních a mechanických vlastností jejich dřeva poté, co projde tepelnou úpravou. Cílem bylo zejména posoudit faktor stupně úpravy na jednotlivé dřeviny, faktor druhu dřeviny a zejména posoudit případný rozdíl vlivu tepelné úpravy mezi dřevinami. Tepelná modifikace podle procesu Thermowood byla provedena na zkušebních tělesech smrku i jedle při teplotách hlavní fáze úpravy 180 °C a 200 °C, doba trvání hlavní fáze úpravy byla nastavena shodně pro obě teploty a to 3 hodiny. Mezi posuzované fyzikální dřeviny patří: hustota, barva, smáčivost, drsnost a bobtnání. Sledované mechanické vlastnosti byly: statická pevnost a modul pružnosti v ohybu, rázová houževnatost a tvrdost. Výsledky byly statisticky zpracovány a prezentovány v tabelární, grafické a textové podobě. Ze statistických nástrojů byla využita dvou-faktorová ANOVA, post-hoc Tukeyho test a ukazatelé základní statistiky aritmetický průměr, směrodatná odchylka, minimum, maximum, variační koeficient. Statistika byla doplněna výpočtem procentuálních změn. Ke grafické prezentaci výstupů z ANOVY byly použity krabicové grafy. Následně byly stanovené hodnoty a trendy porovnány s údaji v dostupné literatuře.

Statisticky významný rozdíl vlivu úpravy na smrk a jedli byl pozorován u smáčivosti, bobtnání v tangenciálním směru, a objemového bobtnání. Smáčivost reprezentovaná kontaktním úhlem byla v neupraveném stavu významně nižší (tedy kontaktní úhel větší) u smrku než u jedle, ale po tepelné úpravě při 180 °C byla smáčivost vzorků obou dřevin téměř totožná. Úprava při 200 °C v porovnání s 180 °C pouze snížila variabilitu výsledků. Vliv úpravy na objemové a tangenciální bobtnání měl podobný charakter: rozdíl míry bobtnání neupraveného dřeva smrku a jedle se po úpravě při 180 °C stal statisticky nevýznamným, úprava při 200 °C dále snížila rozdíl v míře bobtnání. V ostatních případech neměla úprava statisticky významně rozdílný vliv na dřevo jednotlivých dřevin.

Výsledky dalších měření nepřinesly žádné trendy výrazně mimo očekávání. Je ale nutno podotknout, že porovnání s hodnotami z jiných měření nelze vždy porovnávat v absolutních číslech, ani nemusí souhlasit trend. Nejen kvůli heterogenní podstatě dřeva, ale především kvůli rozdílným postupům, teplotám, době trvání a atmosféře v průběhu úpravy aplikovaným v různých studiích.

Smáčivost obou dřevin se výrazně snížila, přičemž rozdíl mezi neupraveným smrkem a jedlí po úpravě vymizel a dřeva obou dřevin vykazovala téměř shodný kontaktní úhel přisedlé kapky. Míra bobtnání má statisticky významný rozdíl vlivu úpravy na jedli a smrk u tangenciálního a objemového bobtnání. Celkově se v souvislosti s tepelnou úpravou snížilo bobtnání o cca 10 % u jedle ošetřené při 180 °C, o 25 % při 200 °C. U smrku se snížila o cca 15 % (v tangenciálním směru a objemovém bobtnání), 26 % v radiálním směru pro úpravu při 180 °C a o cca 32 % pro úpravu při 200 °C. Tvrdost u dřeva smrku i jedle nejprve vzrostla, přibližně o 20 % v porovnání s referenčním měřením, poté u dřeva obou dřevin klesla, nicméně stále zůstala nad tvrdostí referenční série. Statický modul pružnosti v ohybu dřeva obou dřevin se po úpravě držel na původních hodnotách nebo mírně (statisticky nevýznamně) vzrostl. Pevnost ve statickém ohybu se po úpravě při 180 °C téměř nezměnila, významný pokles nastal po úpravě při 200 °C, přičemž se pevnost jedle snížila o 29 %, smrku o 24 %. Vyšší pokles byl zaznamenán u rázové houževnatosti a to 22 % u jedle a 24 % u smrku po úpravě při 180 °C, 57 % u jedle a 45 % u smrku po úpravě při 200 °C. Barva ztavně ztmavla, s téměř shodným rozdílem od referenční série pro smrk i jedli. Jak stupeň 180 °C, tak 200 °C lze použít k úpravě dřeva za účelem zlepšení vizuálního vjemu. Volba stupně úpravy pak záleží na preferencích uživatele. Drsnost se vlivem úpravy nezměnila.

Nulová hypotéza, že dřevo jedle se tepelnou úpravou mění stejně jako dřevo smrku, se s výjimkou smáčivosti a bobtnání potvrdila. A i zmíněný rozdíl je ve prospěch jedle, díky čemuž se dostává na hodnoty téměř shodné jako u smrku. Tudíž je možné využívat tepelně upravenou jedli stejným způsobem jako smrk, samozřejmě s ohledem na rozdíl absolutních hodnot například pevnosti v ohybu.

Sekundárním cílem této práce bylo rozšíření dat o tepelně upraveném dřevu jedle bělokoré, o které není mnoho údajů. Zároveň by mohlo být zajímavé porovnání s hodnotami jedle obrovské, která má potenciál hospodářsky významnější introdukované dřeviny.

7. Použité zdroje

Literatura

- BORŮVKA, Vlastimil a Marián BABIAK. Vlastnosti dřeva v příkladech. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2016. ISBN 978-80-213-2618-7.
- HILL, Callum A. S. *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. Chichester: John Wiley, 2006. ISBN 0-470-02172-1.
- BODIG, Jozsef; JAYNE, Benjamin A. *Mechanics of wood and wood composites*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.
- DINWOODIE, J. M. Timber, its nature and behaviour. 2nd ed. London: E & FN Spon, 2000. ISBN 0419255508.
- DINWOODIE, J. M., 1982. *Timber Structure, Properties, Conversion and Use*. 7. Londýn: Palgrave. ISBN 978-0-333-60905-7.
- JOHNSON, Rulon E.; DETTRE, Robert H. Wetting of Low-Energy Surfaces. In. BERG, John (ed.). Wettability. New York : Marcel Dekker, 1993, s. 1-74. ISBN 0-8247-9046-4.
- KANÁT, Vojtěch, 2017. *Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva břízy*. Praha. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.
- MUSIL, Ivan a Jana MÖLLEROVÁ. Lesnická dendrologie. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2003. ISBN 80-213-0992-X.
- NOVÁK J. a kol.: *Fyzikální chemie – bakalářský a magisterský kurz*. 1. vydání, VŠCHT Praha, 2008. ISBN 978-80-7080-675-3.
- POŽGAJ, Alexander; CHOVANEC, Dušan; KURJATKO, Stanislav; BABIAK, Marián. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Bratislava : Príroda, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00600-1.
- REINPRECHT, Ladislav a Zuzana VIDHOLDOVÁ. Termodrevo: Thermowood. 1. vydání. S. l.: Šmíraprint, 2011. 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7.
- REINPRECHT, Ladislav. Ochrana dreva: vysokoškolská učebnica: 453 strán, vrátane 83 tabuliek a 220 obrázkov. 1. vydání. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-2351-7.
- REINPRECHT, Ladislav. Wood Deterioration, Protection and Maintenance. 1. vydání. Chichester : JohnWiley & Sons. 2016. ISBN 978-11-19106-53-1

TSOUMIS, George, et al. *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

Elektronické zdroje

BOONSTRA, Michiel J., Joris ACKER, Bôke F. TJEERDSMA a Edo V. KEGEL, 2007. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Annals of Forest Science*. 64(7), 679-690. DOI:

10.1051/forest:2007048. ISSN 1286-4560. Dostupné také z:

<http://link.springer.com/10.1051/forest:2007048>

HOLUB, J. Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Simona Fialová, Ph.D.

ESTEVEZ, Bruno M. a PEREIRA, Helena M.. Wood modification by heat treatment: a review. *BioResources*. 2009, vol. 4, no. 1, 370-404. ISSN 1930-2126.

GIESCHE, Herbert, 2006. Mercury Porosimetry: A General (Practical) Overview. *Particle & Particle Systems Characterization*. 23(1), 9-19. DOI: 10.1002/ppsc.200601009. ISSN 1521-4117.

GURAU, Lidia; IRLE, Mark. Surface roughness evaluation methods for wood products: A review. *Current Forestry Reports*. 2017, vol. 3, no. 2, s. 119-131. ISSN 2198-6436

HOMAN, Waldemar J.; JORISSEN, André JM. Wood modification developments. *Heron*, 2004, 49.4: 360-369.

International Thermowood association. *Thermowood Handbook*. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2010 [online]. [cit. 2020-04-17]. Dostupné z:

<https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat>

KAČÍKOVÁ, Danica; KAČÍK, František; ČABALOVÁ, Iveta; ĎURKOVIČ, Jaroslav. Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood. *Bioresource Technology*. 2013. 144, 669-674. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.110>. ISSN 0960-8524.

KUBOJIMA, Yoshitaka; OKANO, Takeshi; OHTA, Masamitsu. Bending strength and toughness of heat-treated wood. *Journal of Wood Science*. 2000. 46(1), 8-15. ISSN 14350211.

KUČERA, Miloš a ADOLT, Radim, eds. *Narodní inventarizace lesů v České republice – výsledky druhého cyklu 2011–2015* [online]. Vydání první. Brandýs nad Labem: Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, 2019 [cit. 2020-04-17]. ISBN 978-80-88184-24-9. Dostupné z: http://nil.uhul.cz/downloads/kniha_nil2_web.pdf.

KWOK, D. Y.; NEUMANN, A. W. Contact angle measurement and contact angle interpretation. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 1999, vol. 81, no.3 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z WWW: [https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(98\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(98)00087-6). ISSN 0001-8686

Lesnictví 2018. : *ČSÚ* [online]. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/lesnictvi-2018>

LI SHI, Jun; KOCAEFE, D.; Zhang, J. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood process. *Holz Roh Werkst.* 2007, (65), 255–259. DOI: 10.1007/s00107-007-0173-9.

Pannaq OHT wood. *Quijuk* [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://qijuk.com/pannaq>

RAPP, Andreas O.; SAILER, Michael. Heat treatment of wood in Germany - state of the art. In: *Proceedings of the seminar on production of heat treated wood in Europe.* 2000, vol. 20, s. 2000.

TUMEN, Ibrahim, et al. Changes in the chemical structure of thermally treated wood. *BioResources*, 2010, 5.3: 1936-1944.

ZEIDLER, Aleš. *Lexikon dřeva* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/lexikon_dreva.pdf

Normy

ČSN 49 0103 Dřevo. Zist'ovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach. 1979

ČSN 49 0108 Dřevo. Zist'ovanie hustoty. 1993

ČSN 49 0115 Dřevo. Zist'ovanie medze pevnosti v statickom ohybe. 1979

ČSN 49 0116 Dřevo. Metóda zist'ovania modulu pružnosti pri statickom ohybe. 1982

ČSN 49 0117 Dřevo. Rázová húževnatost v ohybe. 1977.

ČSN 49 0126 Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zist'ovania napúčavosti. 1989

ČSN EN 1534 Parkety a jiné dřevěné podlahoviny - Stanovení odolnosti proti vtisku (Brinell) - Zkušební metoda. 2001

ČSN EN ISO 4287 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu:
Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999
ČSN EN ISO CIE 11664-4 Kolorimetrie - Část 4: Kolorimetrický prostor CIE 1976
L*a*b*. 2011

8. Seznam grafů, obrázků, tabulek a příloh

Graf 1: Absolutní vlhkost dřeva v závislosti na teplotě vzduchu a relativní vzdušné vlhkosti (Borůvka, 2016).....	15
Graf 3: Chemické změny v tepelně upraveném dřevě jedle a habru (Tumen, 2010)	33
Graf 4: Průběh tepelné úpravy	38
Graf 5: Pevnost ve statickém ohybuGraf 5: Statický modul pružnosti v ohybu.....	49
Graf 6: Pevnost ve statickém ohybu	50
Graf 7: Rázová houževnatost.....	51
Graf 8: Tvrdost.....	53
Graf 9: Celková barevná změna.....	54
Graf 10: Smáčivost – kontaktní úhel	55
Graf 11: Objemové bobtnání	56
Obrázek 1: Graf těžby jehličnatého dříví v roce 2018 (ČSÚ, 2019)	11
Obrázek 2: Vliv vlhkosti na tlak ve směru vláken (Požgaj a kol., 1997)	16
Obrázek 3: Konfokální mikroskop k měření drsnosti.....	17
Obrázek 4: Měření úhlu na naklánějící se destičce (Novák a kol., 2008)	19
Obrázek 5: Aparatura měření přisedlé kapky (Holub, 2010).....	20
Obrázek 6: Znázornění úhlů přisedlé kapky (Johnson, Dettre, 1993)	20
Obrázek 7: Rozdíl ve změně tvaru po seschnutí řeziva v závislosti na původním umístění v kmeni (Wood handbook, 2010)	21
Obrázek 8: Způsob zatížení zkušebního tělesa při ohybové zkoušce (Požgaj, 1993)	22
Obrázek 9: Příklad grafu zaznamenávajícího zkoušku pevnosti v ohybu	23
Obrázek 10: Průhybová čára (Požgaj, 1997)	24
Obrázek 11: Tvrdoměr Struers Duravision-30	25
Obrázek 12: Změna barvy dřeva borovice v závislosti na teplotě. (ITA, 2003).....	35
Obrázek 13: Systém pořezu vzorků 20x20x300 mm.....	37
Obrázek 14: Spektrofotometr Konica Minolta CM-600d.....	40
Obrázek 15: Přístroj Krüss DSA30E k měření smáčivosti	41
Obrázek 16: UTS Tira v konfiguraci pro tříbodový ohyb	43
Obrázek 17: Charpyho kladivo v připravené pozici	44

Obrázek 18: Příklad lomu po zkoušce na rázovou houževnatost, jedle upravená při 200 °C	52
Tabulka 1: Použití Thermowoodu, kategorie Thermo-S	27
Tabulka 2: Použití Thermowoodu, kategorie Thermo-D.....	28
Tabulka 3: Přehled procentuálních změn sledovaných vlastností	47
Tabulka 4: Souhrnná tabulka základní statistiky, následující strana	57

9. Přílohy

Č.	Fáze	Doba hod	Teplota °C	Strmost °C/hod	Otáčky %	Reverse hod	Podtlak			Paření %	Vlhčení	
							nast. Pa	min. %	klapka %		zap. sek	vyp. sek
1	Ohřev	0.00	40.0	80	50	0.0	30.0	50	60	0	0	0
2	Ohřev	0.00	130.0	15	100	0.0	0.0	50	50	8	0	0
3	Thermo	3.00	180.0	20	100	0.0	10.0	50	5	2	2	500
4	Ochlazení	0.00	130.0	25	0	0.0	5.0	0	10	0	0	0
5	Ochlazení	0.00	60.0	25	90	0.0	0.0	0	60	0	0	0
6		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
7		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
8		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
9		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
10		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
11		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
12		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
13		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
14		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0
15		0.00	0.0	0	0	0.0	0.0	0	0	0	0	0

Příloha 1: Nastavení teplot a strmostí ohřevu pro úpravu při 180 °C

	Skupina 1	Skupina 2	Rozdíl průměrů	p hodnota	Významné
0	180JD	180SM	0,003	0,8642	NEPRAVDA
1	180JD	200JD	-0,0123	0,001	PRAVDA
2	180JD	200SM	-0,014	0,001	PRAVDA
3	180JD	REFJD	0,0078	0,0416	PRAVDA
4	180JD	REFSM	0,0161	0,001	PRAVDA
5	180SM	200JD	-0,0153	0,001	PRAVDA
6	180SM	200SM	-0,0171	0,001	PRAVDA
7	180SM	REFJD	0,0047	0,4404	NEPRAVDA
8	180SM	REFSM	0,013	0,001	PRAVDA
9	200JD	200SM	-0,0017	0,9	NEPRAVDA
10	200JD	REFJD	0,02	0,001	PRAVDA
11	200JD	REFSM	0,0284	0,001	PRAVDA
12	200SM	REFJD	0,0218	0,001	PRAVDA
13	200SM	REFSM	0,0301	0,001	PRAVDA
14	REFJD	REFSM	0,0083	0,0162	PRAVDA

Příloha 2: Tukeyho test pro tangenciální bobtnání

		Součet čtverců	St. volnosti	F hodnota	p hodnota
Hustota	Úprava	0,066	2	24,985	0,000
	Dřevina	0,012	1	9,028	0,003
	Úprava:Dřevina	0,000	2	0,025	0,975
	Reziduální	0,725	549		
Tvrdost	Úprava	1029,869	2	14,376	0,000
	Dřevina	235,586	1	6,577	0,011
	Úprava:Dřevina	11,543	2	0,161	0,851
	Reziduální	17443,441	487		
Pevnost v ohybu	Úprava	19817,572	2	67,560	0,000
	Dřevina	3542,224	1	24,151	0,000
	Úprava:Dřevina	363,750	2	1,240	0,291
	Reziduální	31680,170	216		
Statický modul pružnosti	Úprava	6412109,460	2	2,548	0,081
	Dřevina	56359634,555	1	44,794	0,000
	Úprava:Dřevina	1234549,517	2	0,491	0,613
	Reziduální	271768678,855	216		
Rázová houževnatost	Úprava	466,857	2	91,862	0,000
	Dřevina	0,745	1	0,293	0,589
	Úprava:Dřevina	15,441	2	3,038	0,050
	Reziduální	564,118	222		
Světlost L*	Úprava	214867,797	2	4850,239	0,000
	Dřevina	1043,433	1	47,107	0,000
	Úprava:Dřevina	80,270	2	1,812	0,164
	Reziduální	12160,474	549		
Drsnost Ra	Úprava	1,858	2	0,369	0,692
	Dřevina	1,499	1	0,595	0,441
	Úprava:Dřevina	2,033	2	0,403	0,668
	Reziduální	1328,169	527		
Smáčivost	Úprava	399290,129	2	1469,075	0,000
	Dřevina	8934,314	1	65,743	0,000
	Úprava:Dřevina	10866,444	2	39,980	0,000
	Reziduální	73792,879	543		
Barevná změna	Úprava	19059,806	1	570,915	0,000
	Dřevina	21,587	1	0,647	0,422
	Úprava:Dřevina	0,035	1	0,001	0,974
	Reziduální	8947,085	268		
Bobtnání tg	Úprava	0,0308	2	86,452	3,398E-30
	Dřevina	0,0009	1	5,060	0,025
	Úprava:Dřevina	0,0013	2	3,569	0,029
	Reziduální	0,0518	291		
Bobtnání objemové	Úprava	0,1159	2	145,039	1,997E-44
	Dřevina	0,0031	1	7,779	0,006
	Úprava:Dřevina	0,0030	2	3,711	0,026
	Reziduální	0,1163	291		

Příloha 3: Výsledky ANOVY pro jednotlivé vlastnosti