

Mendelova univerzita v Brně
Lesnická a dřevařská fakulta
Ústav nauky o dřevě

Vliv tepelné modifikace na vybrané vlastnosti bukového
dřeva tlakově impregnovaného přírodními oleji

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Čermák, Ph.D.

Vypracoval:

Václav Daněk

Brno 2016

Zde bude zadání BP.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem práci: „Vliv tepelné modifikace na vybrané vlastnosti bukového dřeva tlakově impregnovaného přírodními oleji“ zpracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona c. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon c. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:.....

.....

Václav Daněk

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval Ing. Petru Čermákovi za odborné vedení a přínosné rady během tvorby této bakalářské práce. Dále velmi děkuji své rodině a kamarádům za morální podporu během celého studia.

Abstrakt:

Předmětem předkládané bakalářské práce je analýza procesu tepelné modifikace bukového dřeva (*Fagus sylvatica* L.) tlakově impregnovaného přírodními oleji a sledování vlivu těchto úprav na fyzikální a mechanické vlastnosti. Dřevo buku bylo tlakově impregnováno přírodním konopným olejem (O 1000) a následně tepelně modifikováno při teplotě 200°C po dobu 3 hodin. Vliv jednotlivých stupňů úpravy (impregnace olejem, tepelná modifikace, kombinace) byl analyzován pomocí zkoušek fyzikálních a mechanických vlastností. Barevné změny (CIELab systém), rozměrová stabilita a ohybová pevnost byly experimentálně stanoveny a výsledky porovnány se skupinou neupravených (referenčních) vzorků. Výsledky práce byly dále diskutovány a porovnány s odbornou literaturou.

Výsledky prokazují zvýšení rozměrové stability o 18% (ASE) pro tepelně modifikované dřeva a 22% pro dřevo impregnované oleji a následně tepelně upravené. Ohybová pevnost se po tepelné modifikaci, v důsledku degradace buněčné stěny, snížila o 5,2% a zároveň zvýšila o 9% pro dřevo impregnované olejem. Práci by bylo vhodné dále rozšířit o další stupně úpravy (teploty a časy) a druhy olejů (vysychavé, polo vysychavé, nevysychavé).

Klíčová slova:

modifikace dřeva, tepelná modifikace, impregnace, ohybová pevnost, konopný olej, rozměrová stabilita, změna barvy, dřevo

Abstract:

Present study aims to analyze thermal modification of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) press-impregnated by natural oil and its influence on physical and mechanical properties of wood. Beech wood was press-impregnated by hemp oil (O 1000) and thermally modified at 200°C for 3 hours. Influence of certain treatment (i.e. oil impregnation, thermal modification, combination) was experimentally investigated using physical and mechanical tests. Color changes (CIELab system), dimensional stability and bending strength were experimentally measured and results compared with reference group. Results of given work was further discussed and compared with literature.

Results shows increase of dimensional stability about 18% after thermal modification (TM) and 22% for oil impregnated and thermally modified wood (OL+TM). Mechanical performance (bending strength) decreased about 5,2% after thermal modification as a results of degradation of wood cell wall. On the other hand, strength increase about 9% for wood impregnated by oils. Combined processed provide results within similar range as reference. Results should be further discussed and parameters of process (temperature levels) as well as influence of various oils parameters (drying, semi-drying, nondrying) tested in future.

Key words:

Wood impregnation, thermal modification, beech wood, dimensional stability, bending strength, color changes, wood modification, hemp oil.

Obsah

Obsah	7
1 Úvod	9
2 Cíl práce.....	10
3 Literární přehled	11
3.1 Buk lesní (<i>Fagus sylvatica</i> L.)	11
3.2 Modifikace dřeva	12
3.3 Impregnace dřeva	12
3.3.1 Propustnost tekutin ve dřevě - impregnovatelnost	13
3.3.2 Impregnační látky.....	13
3.3.3 Impregnační metody.....	15
3.3.4 Beztlaková impregnace	15
3.3.5 Tlaková impregnace	16
3.4 Tepelná modifikace dřeva	17
3.4.1 Chemické složení	17
3.4.2 Anatomická stavba	18
3.4.3 Materiálové vlastnosti	18
3.5 Využití modifikovaného dřeva ve stavbách.....	19
4 Materiál a Metodika	21
4.1 Materiál	21
4.2 Metodika	21
4.2.1 Podtlaková impregnace	22
4.2.2 Tepelná modifikace	24
4.2.3 Materiálové vlastnosti	26
5 Výsledky.....	31
5.1 Hmotnostní přírůst po impregnaci	31
5.2 Hmotnostní úbytek po tepelné modifikaci	31
5.3 Bobtnání a efektivita omezení bobtnání (ASE).....	32
5.4 Pevnost ve statickém ohybu	34
5.5 Barevná změna	36
6 Diskuze	38
6.1 Příjem impregnační látky	38
6.2 Hmotnostní úbytek	38

6.3	Bobtnání.....	38
6.3.1	Koeficient efektivity omezení bobtnání.....	39
6.4	Ohybová pevnost.....	40
6.5	Modul pružnosti.....	40
6.6	Barevné změny.....	41
6.7	Možnosti využití modifikovaného materiálu ve stavbách.....	41
7	Závěr.....	43
8	Summary.....	44
9	Použitá Literatura	45

1 Úvod

Dřevem jako materiálem jsme obklopeni všude kolem nás, tento obnovitelný zdroj je hojně využíván v lidském životě, i když tomu tak nemusí být napořád. Vlivem nepříznivého klimatu, plýtvání či nešetrného zpracování se může kvalita suroviny snížit, proto se hledají nové způsoby jak dřevo upravit, eliminovat jeho negativní vlastnosti a případně vylepšit jeho pozitivní vlastnosti kvůli kterým nachází široké uplatnění. Příkladem takové negativní vlastnosti je například změna příčných rozměrů a objemu v důsledku změny vlhkosti, tj. bobtnání a sesychání. Dalším příkladem mohou být biotičtí činitelé, jako jsou houby nebo plísně, které dokážou za určitých podmínek dřevo degradovat. Z těchto důvodů má tento materiál dodnes určitá omezení při některých aplikacích a jsou vyhledávány způsoby jak dřevo chránit, popř. zvyšovat jeho užité vlastnosti.

V současné době jsou již známy způsoby jak tyto negativní vlastnosti zmírnit, eliminovat případně zcela odstranit. Existuje celá řada dřevěných výrobků, které jsou modifikovány a plně splňují požadavky tam, kde by přírodní, neupravené dřevo neuspělo. Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.) je dřevina, která se hojně vyskytuje na celém území Evropy. I přes vynikající vlastnosti dřeva buku (pevnost, houževnatost, obrobiteľnosť, atd.) má tento materiál jisté nevýhody, které neumožňují jeho širší využití (nízká biologická odolnosť, rozměrová stabilita, atd.). Díky modifikaci vlastností dřeva by mohlo dojít ke zlepšení těchto nevýhod a k nalezení širšího uplatnění tohoto dřeva jak v interiéru, tak v exteriéru. Některými z možných způsobů, jak tyto změny eliminovat se věnuje předkládaná BP práce.

2 Cíl práce

Cílem této práce je analyzovat vliv vybraných modifikací na dřevo a to konkrétně podtlakové impregnace, tepelné modifikace, a kombinace těchto dvou metod úpravy dřeva. Následně posouzení vhodnosti využití těchto materiálů ve výrobcích, či přímo v konstrukcích staveb.

Dílčím cílem bylo sledovat vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti

- a) Sledování vlivu jednotlivých stupňů úpravy na barevné změny
- b) Analýza rozměrové stability modifikovaného dřeva
- c) Vliv modifikace dřeva na ohybovou pevnost

3 Literární přehled

3.1 Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.)

Buk lesní je listnatý opadavý strom patřící do čeledi bukovitých (*Fagaceae*). Buk dorůstá až do výšky 45 metrů a jeho přirozený výskyt zahrnuje prakticky celou Evropu. Bukové dřevo je tvrdé, málo pružné a poměrně pevné. Barvu má hnědou až narůžovělou, po paření získá tmavší charakteristickou barvu. Je velmi stejnorodý a hustý. Je to roztroušená dřevina se špatně znatelnými letokruhy. Dřevo buku je málo trvanlivé a málo odolné vůči biotickým činitelům, dále se velmi dobře impregnuje, paří, moří ale špatně se suší vzhledem k tomu, že má sklony k tvorbě trhlin a borcení. Bukové dřevo se využívá především v nábytkářství, výborně se hodí na výrobu ohýbaného nábytku. Je důležitou surovinou pro výrobu dýh, parket, železničních pražců, a dále pro chemické a polochemické zpracování dřeva. Využívá se také jako konstrukční materiál při výrobě dopravních prostředků, doplňků strojů nebo například na výrobu drobných předmětů a doplňků.



Obr.1 Bukový porost (Daněk 2015)

3.2 Modifikace dřeva

Již od dávných dob se lidstvo snažilo ochránit své výrobky ze dřeva před degradací, již staré civilizace jako je Čína nebo Egypt impregnovali nebo opalovali konce kůlů kvůli vyšší trvanlivosti při styku s půdou. Dřevo modifikujeme za účelem zachovat, či dokonce zlepšit původní vlastnosti a zároveň pokud možno eliminovat nežádoucí vlastnosti. Jedna z hlavních vlastností, kterou lze modifikací ovlivnit je rozměrová stabilita. Příčinou rozměrové nestálosti je schopnost dřeva vázat vodu, ovšem obsah vlhkosti ve dřevě neovlivňuje pouze rozměrovou stálost, ale i mechanické vlastnosti. Tyto nedostatky dřeva se snažíme zmírnit právě cílenou modifikací dřeva. Modifikace lze provádět za použití zvýšeného tlaku, zvýšené teploty, za použití chemických činitelů či mikrovlnným zářením (Hill 2006, Theomen a kol. 2010). S vědeckým zkoumáním a experimentováním s úpravou dřeva se začínalo již ve 20 a 30 letech 20 století (Kollmann 1951). Současným trendem od konce 20 století je prodloužení životnosti výrobků ze dřeva bez využití škodlivých chemických látek zatěžujících životní prostředí. Zároveň se stále větší pozornost upírá na eliminaci působení vnějších vlivů a zlepšení vlastností pozitivních, díky kterým je dřevo tak ceněno. Účelem této úpravy dřeva je i snížení spotřeby fungicidních a insekticidních prostředků, nahrazení exotických dřev tuzemskými a zlepšení využití domácí suroviny. Základem modifikace dřeva je změna vlastnosti na úrovni buněčné stěny, kde se upraví počet volných hydroxylových skupin za použití různého působení fyzikálních či chemických činitelů.

3.3 Impregnace dřeva

Impregnace je velmi rozšířená metoda ochrany dřeva, díky které má materiál vysokou odolnost vůči biotickým činitelům jako jsou houby a hmyz. Tito činitelé potřebují ke svému působení určité podmínky jako je teplota a vlhkost. Tyto podmínky panují v našem podnebném pásu zcela běžně. V minulosti se impregnace využívala převážně na železniční pražce, sloupy elektrického vedení a pro dlužní dříví. Z většiny se používaly nebezpečné toxické látky, které mohou být škodlivé jak pro životní prostředí, tak i pro člověka. Jsou to látky jednoduchých organických sloučenin či jejich směsi. V dnešní době se projevuje trend opouštění od klasických látek na bázi těžkých kovů k látkám, které jsou méně škodlivé pro prostředí a zároveň poskytnou dostatečnou

ochranu materiálu (přírodní oleje, nanočástice, atd.). Schopnost dřeva pojmout impregnační látku závisí na anatomické stavbě a vlhkosti dřeva. Pro hydrofobní olejové látky je ideální vlhkost dřeva pod 25% a pro roztoky založené na vodě je doporučená vlhkost 30 až 40%. Dále velký význam v impregnaci hraje zvolená dřevina. U jehličnanů, jako jsou borovice či modřín lze v příčném směru snadno impregnovat bělové dřevo, o poznání nižší schopnost průniku prokazuje jedle a smrk. U listnatých dřevin se snadno impregnuje bělové dřevo dubu a dřeviny roztroušeně pórovité. Velmi dobře se impregnuje dřevo buku v případě, že neobsahuje nepravé jádro. Celkově pro všechna jak listnatá tak jehličnatá jádra platí, že jsou málo propustná.

3.3.1 Propustnost tekutin ve dřevě - impregnovatelnost

Propustnost je jedna z nejdůležitějších faktorů pro impregnaci, která zásadně ovlivňuje kolik látky a hlavně do jaké hloubky je možno ji aplikovat. Objemový tok tekutin je dán gradientem vnějšího tlaku – buď kapilárního, nebo statického. Tento jev nazýváme hydrodynamickým pohybem. Jednou z podmínek a měřítek propustnosti je pórovitost, dále je důležitá průchodnost ztenčeninami buněčných stěn nebo dřeňových paprsků, případně perforovanými přehrádkami cév, což nazýváme průchodnost kapilárního systému. Propustnost je tedy rozdílná s každou dřevinou, případně i s každým kusem materiálu. Udává se, že propustnost v podélném směru je největší, výrazně nižší je v radiálním a nejnižší je v tangenciálním směru (Horáček 2008).

3.3.2 Impregnační látky

Jako impregnační látky se využívají vodou ředitelné roztoky, které jsou vůči dřevu prakticky netečné a nemění jeho chemické vlastnosti. Některé oleje dokážou částečně snížit jeho pevnost, podobně jako přítomnost vody. K porušení celistvosti dřeva může dojít pouze v extrémních případech při tlakové impregnaci. Existují chemické látky, které se vážou na dřevo a přitom nesnižují jeho pevnost, ale jsou i takové, které nenávratně naruší buněčnou stěnu a mohou tak značně snížit pevnost dřeva. Jedná se například o chemické látky, které jsou založeny na bázi amoniaku, který se při modifikaci hojně využíval například na výrobu modifikovaného bukového dřeva známého pod obchodním názvem Lignamon (Weigl 2012). Kromě vlastní impregnační látky má zásadní vliv na kvalitu impregnace i teplota a tlak uvnitř impregnačního autoklávu (Horský 1997).

Impregnační látky můžeme dělit do několika skupin, první takovou skupinou jsou pryskyřice, které díky svým vlastnostem nacházejí široké uplatnění. Můžeme je dělit na přírodní a syntetické. Mezi nejpoužívanější syntetické patřila fenolformaldehydová pryskyřice, která měla vysokou schopnost pronikat do dřeva, nebo pryskyřice epoxidové, polyuretanové, ale i pryskyřice melaminformaldehydové a močovinoformaldehydové které se začaly vyrábět později. Tyto látky díky průniku do buněčné stěny výrazně snížily rovnovážnou vlhkost dřeva. Nevýhoda takto impregnovaného dřeva je problém s ekologickou likvidací. K přírodním pryskyřicím se řadí kalafuna a mastix. To jsou látky rostlinného původu. Živočišného je například šelak. Výhodou přírodních pryskyřic k impregnaci dřeva je snadnější a ekologičtější likvidace nepotřebného modifikovaného dřeva (Kuriál 2002). Další skupinou látek jsou soli. Chlorid sodný (NaCl) je chemická sloučenina, která se ve volné přírodě vyskytuje pod známým názvem sůl kamenná. Při impregnaci tyto látky vnikají do buněčných stěn. V důsledku vysušení se koncentrace soli značně zvýší, což má za následek snížení sesychání dřeva, zároveň soli fungují jako konzervační látky a působí preventivně vůči plísním, dřevokazným houbám a hmyzu. Sacharidy jsou také skupinou impregnačních látek. Využívá se především sacharóza, která má chemické složení podobné celulóze. Sacharóza proniká do buněčných dutin, kde krystalizuje a do buněčných stěn kde vytváří amorfni sklovitou vrstvu. Díky tomu má dřevo vyšší rozměrovou stabilitu v prostředí, kde dochází ke kolísání relativní vlhkosti. Úprava dřeva cukry se považuje za nehořlavou, neexplozivní a z hlediska životního prostředí nezávadnou. Existuje také skupina křemičitanů, které se využívají při impregnaci, jsou to kyslíkaté sloučeniny křemíku. Materiál po impregnaci křemičitany vyniká svojí zvýšenou tvrdostí, ovšem určitou nevýhodou je vyšší křehkost materiálu. Důležitou skupinou jsou i vosky a oleje. Proniknutí těchto látek do struktury dřeva je poměrně obtížné. Odolnost takto upraveného dřeva proti vlhkosti se značně zvýší. Zajímavou metodou úpravy je využití přírodních olejů, kdy se zvýší hydrofobnost dřeva, což ovlivňuje i rozměrovou stabilitu. Některé oleje jsou díky své toxicitě vhodné i pro ochranu proti biotickým činitelům. Současným trendem je kombinování impregnací vosků a olejů, případně pryskyřic. Další možností je využití látky polyethylenglykol (PEG) který se využíval především v konzervátorské praxi. Také se využívá pro aktivní chemickou úpravu furfurylalkohol (FA). Z hlediska chemické reakce je tato úprava označována jako síťování. Na konec nesmíme opomenout látku amoniak neboli čpavek, který má za následek změny chemického charakteru. Výsledkem je zvýšená deformovatelnost dřeva a zároveň

změna barvy do tmavších odstínů. Využívá se ke zvýšení plasticity dřeva před lisováním, ohýbáním či reliéfováním.

3.3.3 Impregnační metody

V dnešní době rozeznáváme několik metod impregnace, existuje impregnace za normálního atmosférického tlaku, nebo za sníženého či zvýšeného tlaku. Při technologii s využitím atmosférického tlaku je podstatou transportu látek do dřeva kapilární tlak. Při těchto technologiích je výsledek impregnace výrazně ovlivněn smáčením povrchu dřeva kapalinou. Při impregnaci ponořením je smáčení kapaliny méně důležité než při impregnaci nátěrem nebo postřikem. Častěji se využívá impregnace za sníženého tlaku prostředí, která je účinnější. Při těchto metodách se využívají vnější tlakové síly. Vliv na průnik do dřeva má jak provedené metoda, tak i zvolená látka a stav materiálu určeného k impregnaci.

3.3.4 Beztlaková impregnace

Beztlaková impregnace je zaměřena především na impregnaci povrchové vrstvy, tedy není vhodná pro ochranu dřeva chemickými látkami před dřevokaznými houbami a hmyzem, jelikož pod touto tenkou povrchovou vrstvou je dřevo, které již je snadno napadnutelné. Jedná se především o máčení, postřiky a ponořování. Tyto způsoby se využívají jen tehdy, kdy se nepočítá s vytvořením dodatečných trhlin nebo poškození, protože tyto vady mohou povrchovou impregnaci zcela znehodnotit. Zároveň je nevhodné takto upravovat již napadené dřevo, jelikož tímto způsobem nejsou škodlivé zárodky zahubeny a mohou dále degradovat dřevo. Výhodou zůstává průnik impregnační látky minimálně do částí běle dřeva, kde provádí především dřevokazný hmyz svůj žír a vývoj (Holan 2006).

Zvýšení efektivity máčení dřeva lze dosáhnout kombinací studených a teplých lázní, kdy se v horké lázni vzduch ve dřevě roztáhne a v následující studené lázni se ochladí a tím se dřevo smrští, takže vznikne částečné vakuum a impregnační látka se dostává dále do hloubky dřeva díky tlaku okolního vzduchu. Teplota horké lázně se pohybuje 80 – 100 °C a více, chladná lázeň má 35 až 50 °C. Doba v lázni se pohybuje okolo 1–12 hodin. Hloubka průniku u beztlakové impregnace je 1–2 mm, u prostředků na bázi organických rozpouštědel a olejovitých je 4–8 mm. U dlouhodobého máčení je hloubka průniku větší (Horák a kol. 1974).

3.3.5 Tlaková impregnace

Tlaková impregnace je známá již od 30 let 19. století kdy John Bethell vyvinul první metodu pro přetlakovou impregnaci dřeva. Z počátku nacházel využití hlavně ve výrobě železničních pražců a sloupů. V dnešní době je známo již mnoho dalších metod impregnace. Hlavním smyslem přetlakové impregnace je optimální dosažení příjmu látky díky rozdílným tlakům uvnitř a vně dřeva. Kombinací teplot a tlaků dosáhneme maximálního nasycení impregnační látkou již v relativně krátké době. Hloubka průniku je od 3mm po několik centimetrů. Pro tlakovou impregnaci jsou potřeba již speciální impregnační stanice. Bethellova metoda se využívá, pokud je účelem dostat co nejvíce impregnační látky do dřeva. Během procesu se vytvoří podtlak a napustí se látka, v další fázi se vytvoří přetlak. Na závěr se vypustí přebytečná látka a opět se vytvoří podtlak. Je to varianta kdy se naplní impregnační látkou lumeny buněk dřeva, proto je vysoká spotřeba látky a u takto upraveného materiálu se může projevit rojení látky. V minulosti se tato metoda hojně využívala při impregnaci dehtovým olejem.

V případě, že chceme ušetřit impregnační látku je postup rozdílný. Hlavní rozdíl je v počáteční fázi, kde se místo metody dle Bethella (vytvoření podtlaku) vytvoří naopak přetlak, který natlačí vzduch do buněčných prostor, v další fázi se přidá impregnační látka, která se dostane do buněčných stěn, tímto způsobem je úspora látky poloviční. Tato metoda podle Ruppinga je nejrozšířenější a nejpoužívanější metoda impregnace pro rovnoměrné a kvalitní úpravy.

Pro dosažení potřebné úrovně impregnace jsou tyto postupy v různých variantách, kombinacích či opakovaných cyklech. Jedním z nejpoužívanějších variant je dvojitý Ruppung. Princip je prakticky stejný jen se proces opakuje dvakrát za sebou. Postup je využívá na těžce proimpregnovatelné druhy dřeva jako je například dub.

Je známa i metoda kdy se přetlak nevyužívá vůbec. Vakuová metoda spočívá v tom, že v impregnačním kotli se nejprve vyvolá podtlak okolo 20 kPa. Po dosažení požadovaného podtlaku se přivede do kotle ochranná látka, poté se podtlak přeruší a na prostředek působí atmosférický tlak. Čas působení závisí na požadované hloubce průniku i na druhu dřeva, po vypuštění ochranné látky začíná opět působit závěrečný podtlak.

3.4 Tepelná modifikace dřeva

Tepelná modifikace dřeva je jedna z nejstarších a nejrozšířenějších metod úpravy dřeva. Základem je odbourávání hydroxylových skupin (OH-) při zvýšené teploty (160-260°C) v prostředí inertní atmosféry. Takovýto proces úpravy je doprovázen úbytkem hmotnosti (Svoboda 2013). Výsledkem tepelné úpravy je materiál s nižší rovnovážnou vlhkostí, vyšší rozměrovou stabilitou i odolností vůči působení dřevokazných hub a hmyzu. Modifikované dřevo se zpravidla vyznačuje vyšší křehkostí než dřevo neupravené (Hill 2006, Raap 2001). Úroveň změny vlastností je velmi závislá jak na druhu dřeva, tak i na výrobním procesu a hlavně na teplotě, které byl materiál vystaven. Jako prostředí při tepelné modifikaci se může využít přehřátá pára, podtlak, dusík nebo olejovou lázeň. Tepelná úprava dřeva je jedna z nejekologičtějších úprav vůbec a je prokázáno, že dřevo tepelně upravené nepřináší větší riziko pro životní prostředí než dřevo tepelně neupravené (Hill 2006).

Tepelně modifikované dřevo je jedno z nejběžněji dostupných modifikovaných materiálů na domácím trhu, většinou dováženo ze severských států, především z Finska. Všechny procesy využívají dřevo ve formě řeziva a tepelnou úpravu od 160°C do 260°C, ale liší se v provozních podmínkách, jako je přítomnost ochranného plynu jako dusíku nebo páry, mokrý nebo suchý proces, použití olejů, atd. (Militz 2002). V dnešní době se vyvinuli čtyři hlavní metody tepelné modifikace, které jsou již pevně uvedeny na trhu pod obchodními názvy a značkami (ThermoWOOD, PlatoWOOD, MenzHolz, Retification, atd.). U tepelné modifikace je prokázáno, že snižuje hmotnost dřeva. Studie došly k závěru, že vliv na úbytek hmotnosti má druh dřeva, daná způsob úpravy, médium ohřevu, teplota a čas úpravy. Platí, že při zvýšení teploty a času se hmotností úbytek zvyšuje.

3.4.1 Chemické složení

Chemické změny jsou závislé na čase a teplotě, především teplota je hlavním ovlivňujícím faktorem (Bourgois et al. 1989). Dřevo je možné charakterizovat z chemického hlediska na biopolymerní kompozit složený ze tří základních komponentů což je celulóza, hemicelulózy a lignin, a delších akcesorických látek (extraktivní a anorganické látky), (Rowell 2005). Vlivem tepelné modifikace se rozkládají především hemicelulózy, což má za následek výrazný pokles sorpčních míst (OH skupin). Dochází ke zkracování řetězců celulózy a ke krystalizaci čímž narůstá počet vazeb mezi

jednotlivými polymerními řetězci celulózy přes -OH skupiny a tím klesne počet sorpčních míst. Mezi hemicelulózami a ligninem také dochází ke zvýšenému počtu vazeb. To vše má za následek, že schopnost dřeva absorbovat vodu je snížena a rozměrová nestálost je zmírněna až o polovinu. Zároveň se snižuje rovnovážná vlhkost dřeva (RVD). Pro takto upravené dřevo již nelze použít klasický nomogram pro stanovení rovnovážné vlhkosti v závislosti na vzdušné vlhkosti a teplotě prostředí, jelikož je vlivem snížené vlhkosti pozměněna celá sorpční izoterma. Tím pádem je snížena i mez hygroskopicity. Dále dochází k eliminaci kyslíku vázaného ve dřevě, což je jistá výhoda. Tento kyslík potřebují dřevokazné houby ke svému životu a rozmnožování. Dochází i ke zvyšování hladiny uhlíku, tím vznikají toxické extrakty, které mají vliv na celkové prostředí ve dřevě. Nejvíce jde tato změna vidět na změněné hladině pH, což je dalším faktorem pro odpuzení biotických činitelů.

3.4.2 Anatomická stavba

Modifikace dřeva vytváří změny i v anatomické struktuře dřeva. Při analýze tepelně upraveného dřeva smrku při teplotě 150 °C bylo pozorováno několik trhlin mezi S1 a S2 vrstvou buněčné stěny, podobné poškození bylo nalezeno i na dřevěch břízy a buku (Fengel a Wegener 1989). Konečný efekt změn anatomické stavby po tepelné modifikaci se liší od každého dřeva a daném procesu (Boonster et al. 2006). Studie zabývající se dřevem borovice prokázaly, že vlivem úpravy dochází k poškození epitelových buněk okolo pryskyřičných kanálků. Jehličnatá dřeva jsou celkově náchylná k tangenciálním prasklinám v části letního dřeva. Studie uvádějí, že rozměry pórů po úpravě teplem vzrostly a to pravděpodobně díky úbytku složek v buněčné stěně (Hietala et al. 2002). Vlivem tepelné modifikace se zvyšuje pórovitost buněčných stěn.

3.4.3 Materiálové vlastnosti

Jedním z nejdůležitějších efektů tepelné modifikace je změna rovnovážné vlhkosti dřeva (RVD). Snížení RVD a následné snížení bobtnání a sesychání vlivem vysokých teplot bylo představeno již v roce 1920 Tiemannem, Tato vlastnost platí pro všechny procesy tepelné úpravy. RVD se snižuje až do dosažení minimální hodnoty, např. Esteves et al. (2007a) uvádějí, že RVD byla zlepšena pouze do 4-6% úbytku hmotnosti a při vyšším úbytku zůstává přibližně konstantní. Při studování vlivu tepelné úpravy na adsorbční a desorbční křivky se došlo k závěru, že vliv hystereze zůstává

s nevýznamným vzestupem rozdílů mezi křivkami adsorpce a desorbce (Militz 2002). Tepelná úprava dřeva je příčinou poklesu pevnosti ve dřevě, což je bráno jako nevýhoda protože se takto zpracované dřevo nedá využít pro konstrukční účely. Mechanické vlastnosti se nejčastěji měří zkouškou při statickém ohybu. Nejvíce ovlivněné vlastnosti jsou odolnost vůči statickému ohybu (MOR) a dynamickému namáhání, které je také nazýváno rázovou houževnatostí. Změna vlastností je závislá jak na podmínkách, tak i na druhu dřeva. Při výzkumu dřeva borovice upraveného v prostředí páry bylo prokázáno, že při úbytku hmotnosti do 4 % se zvyšuje MOE a při zvýšení úbytku hmotnosti se MOE snižuje (Esteves et al. 2007b). V případě využití prostředí se vzduchem místo páry byl vyšší pokles MOE. Inoue et al. (1993) poukázali na pokles pevnosti v ohybu pro dřevo Kryptomerie (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D.Don) po dobu 8 hodin při teplotách 220°C, 200°C a 180°C a to o 80%, 45% a 20%. MOE nepatrně vzrostl pro dřevo upravené 180 a 200°C, 10% poklesu bylo dosaženo po 20 hodinách po 180°C, po 8 hodinách při 200 °C. Při 220 °C došlo k poklesu až o 60% už za 7 hodin úpravy. Studie uvádějí, že dřevo z vyšší vlhkosti než 30% ztrácí svou pevnost mnohem rychleji než dřevo vysušené (Mitchell 1988). Naopak Kubojima et al. (2000a) uvádí, že efekt tepelné úpravy má podobný vliv jak na dřevo suché, tak na dřevo mokré. Stejní autoři uvádějí, že Youngův modul pružnosti a pevnost v ohybu zpočátku vzrostly a poté se snižovaly, a to více v prostředí se vzduchem než v prostředí s dusíkem. Výzkum tepelné modifikace byl proveden i na dřevě javoru (*Acer trautvetteri* Medw.) kde byl potvrzen pokles hustoty (Korkut a Guller 2008). U jehličnanů borovici a smrku byl pokles hustoty 10% a 8,5% (Boonstra et al. 2007a). Vlivem tepelné modifikace se také zvyšuje křehkost dřeva a platí, že křehkost se zvyšuje s danou teplotou a dobou úpravy.

3.5 Využití modifikovaného dřeva ve stavbách

Při možnostech využití modifikovaného dřeva vzhledem k jeho vlastnostem je jisté že takto upravený materiál se výborně hodí na estetické účely jak do interiéru, tak hlavně do exteriéru díky jeho rozměrové stálosti. Ovšem je možné tepelně upravené dřevo použít i na konstrukční účely, ovšem pouze v případě, že bereme v potaz druh namáhání, kterému bude materiál vystaven. Autoři Boonstra et al. (2007b) tepelně upravovali dřevo smrku a zjistili 6% snížení pevnosti v ohybu a naopak 17% zvýšení modulu pružnosti. Velmi důležité jsou i přítomnosti vad, které vedou k poklesu pevnosti v ohybu i modulu pružnosti. V současné době je modifikované dřevo využíváno

především tam, kde nedochází k výraznému mechanickému namáhání konstrukce, tj. obložení, podlahové systémy, terasy, venkovní a zahradní nábytek, obložení bazénu, výroba saun. Svoje uplatnění nachází i v oblasti stavebně truhlářské, tj. vnější část vlivů při výrobě okenních ráků. V oblasti hudebních nástrojů je možné využít tento materiál při výrobě kytar.

V současné době jsou studie věnovány vývoji materiálů založených na principu tepelné modifikace, avšak s minimální změnou v mechanických vlastnostech. Jedná se o tzv. nerovnoměrnou tepelnou úpravu dřeva (povrchovou), kdy dochází k modifikaci pouze lokálně, bez výraznějšího vlivu středových částí. Takto upravené materiály by bylo možné využít na konstrukční účely staveb (sloupky konstrukce dřevostaveb, pozednice střešních konstrukcí, atd.). Další z možností je využít kombinaci tepelné a mechanické modifikace (lisování) a dosáhnout tak výrazně vyšší pevnosti. Tento materiál je označován jako VTC (viscoelastic thermal compression) dřevo.

4 Materiál a Metodika

Následující kapitola popisuje zvolený materiál a metodické postupy použité při experimentálních měřeních. Popsané postupy jsou stanoveny dle platných norem (ISO, EN, ASTM), popř. dle metodických postupů obecně používaných v dané oblasti (tepelná úprava dřeva, impregnace dřeva).

4.1 Materiál

Zkušební vzorky byly vyrobeny ze dřeva buku lesního (*Fagus sylvatica* L.) pocházející z bukových porostů v blízkosti vojenského prostoru Libavá v Olomouckém kraji. Dřevo buku bylo vybráno s ohledem na dobrou impregnovatelnost do hloubky. Zkušební vzorky byly pečlivě vybírány dle odklonu letokruhů a vyrobeny jako ortotropní, tj. povolená hranice odklonu letokruhů byla stanovena na 10°. Zkušební vzorky neobsahovaly viditelné vady nebo nepravého jádro, což je důležité pro kvalitu následné impregnace.

4.2 Metodika

Bukové řezivo bylo rozmanipulováno na výřezy a následně tloušťkově hoblováno na konečné rozměry 20 × 20 × 750 mm. Jednotlivé vzorky byly následně délkově zkráceny na končený rozměr 300 mm. Zbytkové odřezky (8ks, cca 100–150 mm), byly dále použity pro další měření (rozměrová stabilita). Zkušební vzorky byly následně rozděleny do 4 skupin po 8 vzorcích, tj. (1) skupina referenční (neupravené dřevo), (2) impregnovaná konopným olejem (OL), (3) tepelně modifikovaná (TM) a (4) impregnovaná a následně tepelně upravená (OL+TM)

Zkušební vzorky byly vysušeny v laboratorní sušárně (SONYO MOV 112F) při teplotě 103 ± 2 °C na vlhkost 0%. Jednotlivé vzorky byly následně převáženy s přesností 0,001 g (Radwag P600 R2) a přeměřeny s přesností 0,01 mm (Mitutyo). Data byly ukládány pomocí programu MS Excel do PC a následně použity pro výpočet hustoty dřeva při vlhkosti 0%.

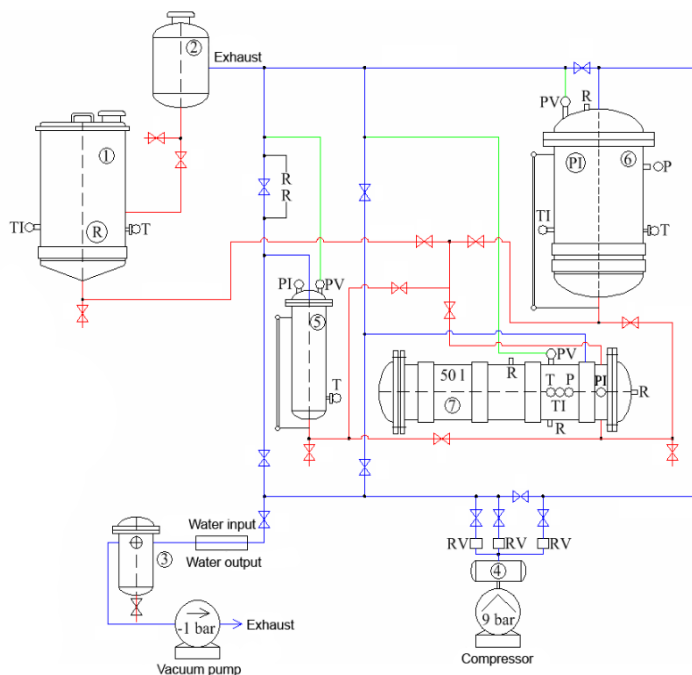
4.2.1 Podtlaková impregnace

Impregnace zkušebních vzorků probíhala na laboratorní vakuově tlakové lince (JHP 1-0072). Impregnovány byly pouze dvě skupiny vzorků, tj. OL a OL+TM. Pro impregnaci dřeva byla zvolena specifická metoda, založené na vakuové impregnační metodě, tedy bez využití přetlaku. Vzorky byly umístěny do nerezové nádoby tak, aby se nedotýkali (ideální pronikání látky do dřeva ze všech směrů). Dále byly vzorky zatíženy závažím, aby během úpravy nedošlo k uvolnění vzorků a následně k nedokonalému proimpregnování. Dále byla nádoba naplněna impregnačním konopným olejem (kapitola 4.2.1.1) tak, aby vzorky byly kompletně ponořeny přibližně 20 mm pod hladinou.

Vlastní proces impregnace probíhal při vytvořeném podtlaku -90kPa po dobu 2 hodin.



Obr.2 Laboratorní vakuově tlaková linka na úpravu vlastností dřeva typ JHP 1-0072



Vysvětlivky:

- 1) Zásobní nádrž
- 2) Výfukový sběrač
- 3) Výfukový sběrač 2
- 4) Vzduchový kompresor
- 5) Odměrná nádrž
- 6) Předehříváč
- 7) Impregnační nádrž

PV- regulátor tlaku

TI- tepelný senzor (digitální)

T – teploměr

PI- tlakový senzor

P-manometr

RV- pojistný ventil

Obr.3 Schematické znázornění vakuově tlakové linky typ JHP 1-0072

Po impregnaci byly vzorky převáženy a na základě hmotností vypočten tzv. hmotnostní přírůstek WPG (weight percentage gain) a příjem impregnační látky (retence). Hmotnostní přírůstek poměruje rozdíl mezi hmotností neupraveného a impregnovaného dřeva. Hmotnostní přírůstek byl vypočten dle vzorce (1)

$$WPG (\%) = \frac{m_m - m_n}{m_n} * 100 \quad (1)$$

Kde m_m je hmotnost modifikovaného vzorku[g], m_n je hmotnost před modifikací [g] a WPG je hmotnost přijaté látky v %.

Příjem impregnační látky udává hmotnost přijaté látky vztažené k objemu dřeva. Příjem je vypočten dle vzorce (2)

$$RETENCE(\%) = \frac{m_m - m_n}{V_n} \quad (2)$$

Kde m_m je hmotnost modifikovaného vzorku[kg], m_n je hmotnost před modifikací [kg], V_n je objem tělesa [m^3]. Retence je hmotnost přijaté látky vyjádřená v kg/m^3 .

4.2.1.1 Konopný olej

Konopný olej napouštěcí O 1000 české výroby, značky Hemp production CZ s.r.o. je určen na ochranu měkkého i tvrdého dřeva, vystaveného povětrnostním podmínkám. Lze jej využít i pro interiérové účely. Tento přírodní konopný olej se vyznačuje zvýšenou odolností proti nasáklivosti dřeva vodou a antibakteriálními účinky. Množství VOC látek je uváděno na 0g/l, olej tedy neobsahuje žádné škodlivé látky a je zdravotně nezávadný. Hustota oleje je 0,85 – 0,92 g/m³.

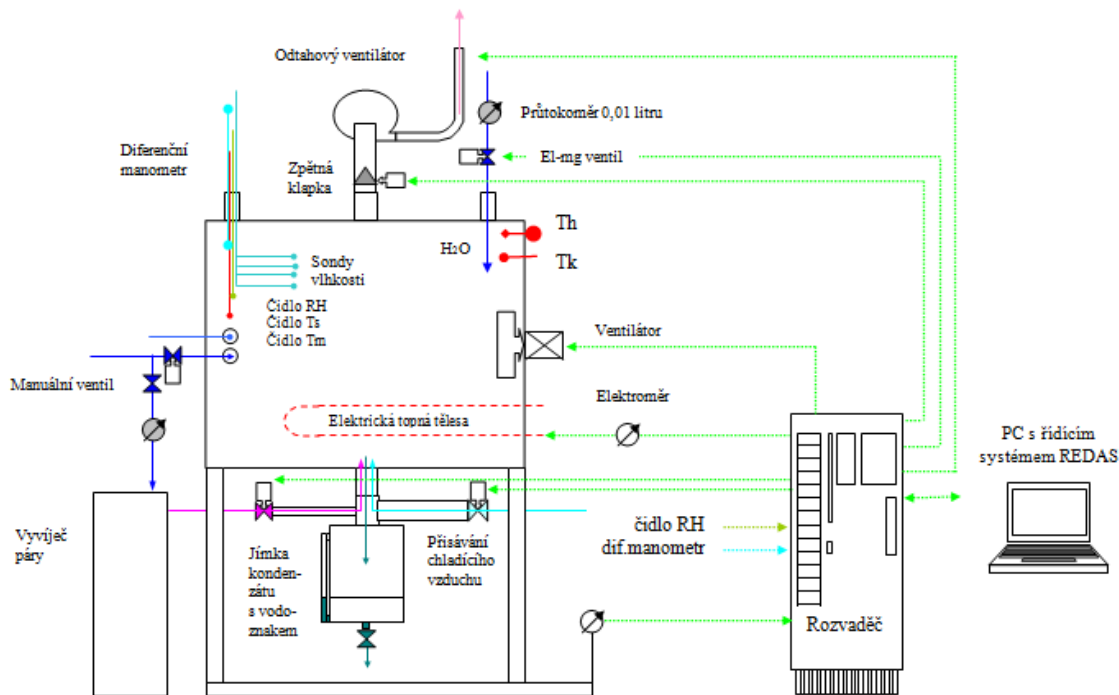
4.2.2 Tepelná modifikace

Tepelná úprava byla prováděna na malokapacitní laboratorní tepelné komoře (Katres s.r.o.). Harmonogram tepelné úpravy se skládal ze 3 stupňů, tj. ohřev, tepelná modifikace, chlazení a byl řízen přes ovládací software.

Proces tepelné úpravy probíhal při teplotě 200°C po dobu 3 hodin (Obr. 5). Hmotnostní úbytek po tepelné úpravě dřeva byl stanoven bezprostředně po skončení procesu modifikace za účelem vyhodnocení stupně modifikace. Hmotnostní úbytek (ML) vzorků byl vypočten dle vzorce (3).

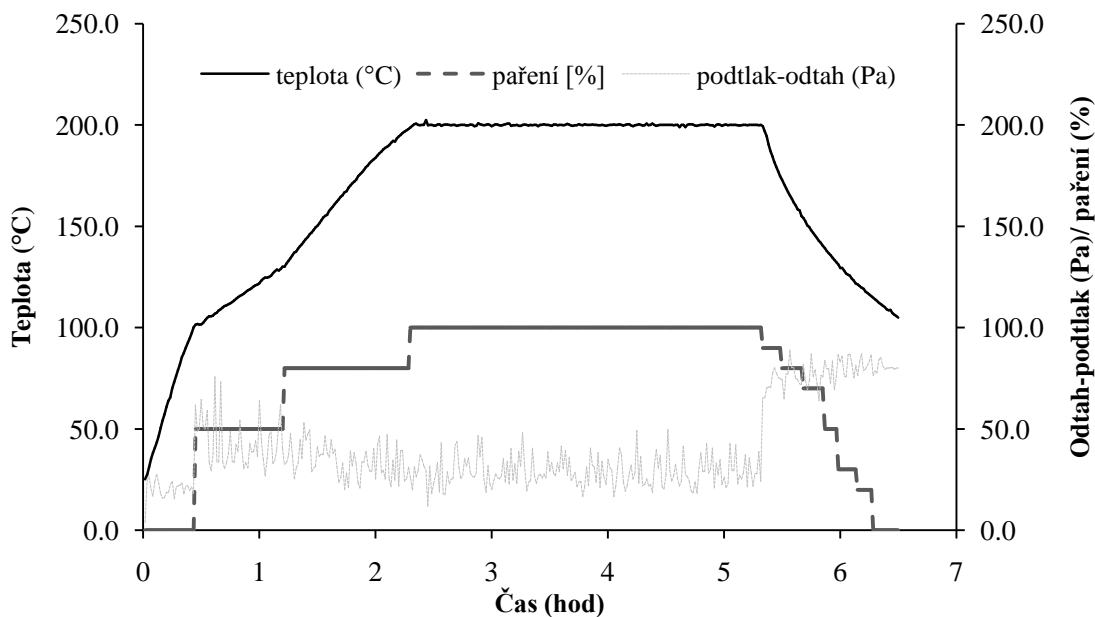
$$ML (\%) = \frac{m_{po} - m_{před}}{m_0} * 100 \quad (3)$$

Kde m_{po} je hmotnost vzorků po tepelné modifikaci [g] a $m_{před}$ je hmotnost vzorků po modifikaci [g]. Výsledný hodnota (ML) je v procentech hmotnosti.



Obr.4 Schematické zobrazení laboratorního zařízení pro tepelnou modifikaci dřeva

Jak můžeme vidět na Obr. 5 celý proces tepelné úpravy lze rozdělit na 3 fáze. První je fáze ohřevu, kdy bylo postupně dosaženo požadované modifikační teploty 200°C, další fází je vlastní tepelná úprava kdy je udržována konstantní teplota (3 hod) a poté nastala fáze ochlazení, kde teploty opět klesla na konečnou provozní teplotu.

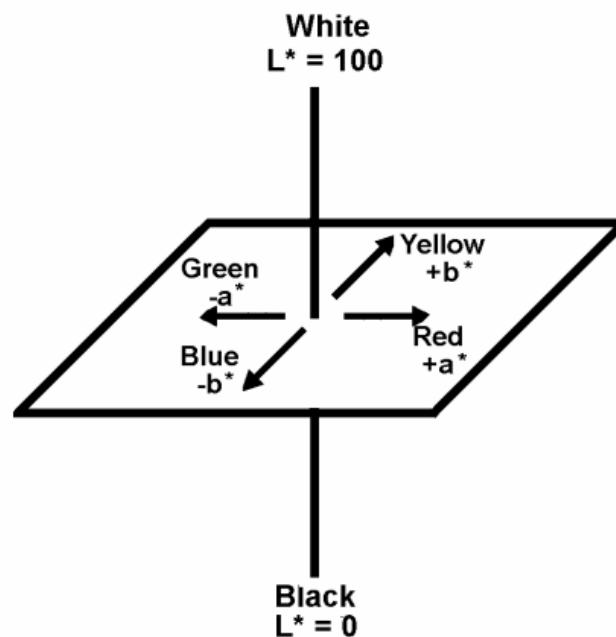


Obr.5 Režim tepelné modifikace – teplota 200 °C, čas 3 hodiny.

4.2.3 Materiálové vlastnosti

4.2.3.1 Barevné změny

Hodnoty barevných změn byly změřeny pomocí přenosného spektrofotometru (Konica Minolta CM-2600D), který vyhodnocuje barevnost podle systému (CIE L^* a^* b^*). Systém CIELAB je založený na rozdílu mezi světlem a tmou, modrou a žlutou, červenou a zelenou barvou. Systém naznačuje hodnoty třemi osami L^* , a^* , b^* . Vertikální osa představuje světlost (označována jako L^*), její hodnoty jsou od 0 (černá) do 100 (bílá). Další osy jsou založeny na základě toho, že barva nemůže být červená a zelená, nebo modrá a žlutá, jelikož jsou tyto barvy proti sobě. Hodnoty na osách jsou pozitivní a negativní. Na ose "a" kladné hodnoty znamenají množství červené, zatímco záporné hodnoty značí množství zelené. Na ose "b" je pozitivní žlutá barva a negativní modrá. Neutrální nulová hodnota je pro všechny osy stejná – šedá barva. Díky hodnotám ze spektrofotometru jsou vypočítány rozdílné hodnoty barevnosti.



Obr.6 Grafické znázornění pozice barvy v systému CIE $L^*a^*b^*$ (Hunter Associates Laboratory, Inc.2007)

Rozdíly mezi původními a konečnými souřadnicemi ΔL^* , Δa^* , Δb^* se vypočítají jako rozdíl mezi konečnou (f – final) L_{f*} , a_{f*} , b_{f*} a počáteční (i – initial) L_{i*} , a_{i*} , b_{i*} souřadnicí (Charrier et al. 2002).

$$\Delta L^* = L_{f*} - L_{i*} \quad (4)$$

$$\Delta a^* = a_{f*} - a_{i*} \quad (5)$$

$$\Delta b^* = b_{f*} - b_{i*} \quad (6)$$

Celková změna barevnosti je určena barevnou odchylkou ΔE^* , ta byla vypočítána dle následujícího vzorce.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (7)$$

4.2.3.2 Pevnost ve statickém ohybu

Jedná se o odolnost dřeva proti vnějšímu zatížení. Pokud je tato pevnost překročena dojde k porušení materiálu. Namáhání dřeva během statického ohybu je poměrně složitý děj, kdy vzniká na vnitřní straně vzorku namáhání tlakem a na vnější straně vzniká namáhání tahem. Mezi těmito deformačními zónami vzniká neutrální osa, kde je napětí rovno nule a zvyšuje se směrem k okrajům tělesa.

Statický ohyb (tříbodý) byl zjištěn pomocí zkušebního stroje Zwick Z050 (Zwick Roell a.s.), na který byl umístěn zkušební vzorek o rozměrech $20 \times 20 \times 300$ mm. Hodnoty meze pevnosti v ohybu jsme zjistily díky posunu příčnicku a vynaložené síle. Zkouška probíhala do doby porušení vzorku. Zatížení působilo na vzorky kolmo na směr vláken v tangenciálním směru se vzdáleností podpěr 196 mm. Mez ohybové pevnosti byla vypočítána dle vzorce (8).

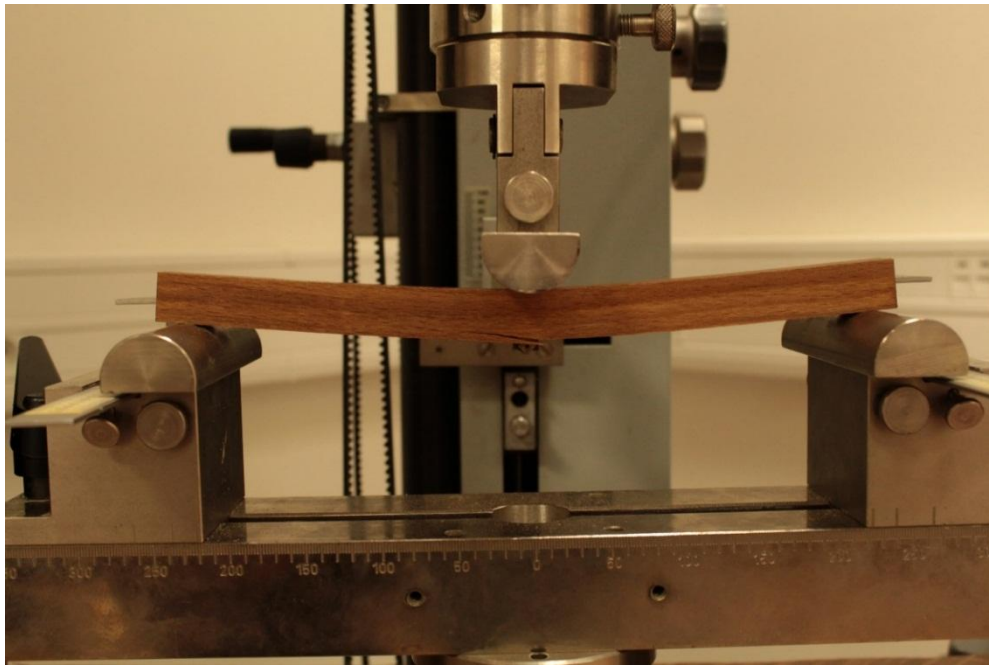
$$\sigma_{\max} = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (8)$$

Kde F je působící síla na zkušební těleso [N], l je vzdálenost mez podpěrami [mm], b je šířka zkušební tělesa [mm] a h je výška zkušební tělesa [mm].

Další z charakteristika popisující schopnost dřeva odolávat deformacím vlivem zatížení je modul pružnosti. Vyjadřuje vnitřní odpor proti deformacím, tedy čím vyšší modul pružnost, tím vyšší napětí je potřeba pro vyvolání deformace materiálu. Modul pružnosti byl vypočten z lineární části zatěžovacího diagramu ze zkoušky ohybové pevnosti a dle vzorce (9).

$$E = \frac{\Delta F l^3}{4bh^3 \times \Delta y} \quad (9)$$

Kde F je působící síla na zkušební těleso [N], l je vzdálenost mez podpěrami [mm], b je šířka zkušebního tělesa [mm] a h je výška zkušebního tělesa [mm], Δy je průhyb zkušebního tělesa [mm].



Obr.7 přelomení vzorku na zkušebním stroji ZDM 5/51 (Daněk 2016)

4.2.3.3 Rozměrová stabilita

Rozměrová stabilita dřeva byla hodnocena pomocí cyklického máčení a sušení. Vybrané vzorky byly ponořeny do vody o teplotě 20°C po dobu 96 hodin v každém z cyklů. Poté byly změřeny tangenciální, radiální a podélné rozměry a hmotnosti nasycených vzorků. Poté byly vzorky vysušeny v laboratorní sušárně na 0%. Z důvodu zabránění výskytu výsušných trhlin bylo sušení prováděno ve 2 fázích, tj. 24 hodin při teplotě 40°C a 48 hodin při teplotě 103°C. Při dosažení vlhkosti 0% byly znovu změřeny rozměry (s přesností na 0,01 mm) a hmotnosti (s přesností na 0,001 g). Takto provedený cyklus máčení a sušení byl opakován 3×. Po měření bylo vypočteno radiální, tangenciální a objemové bobtnání. Dále byl vypočítán koeficient účinnosti omezení bobtnání (anti swelling efficiency – ASE), který je běžně používaný pro stanovení vlivu modifikace dřeva na rozměrovou stabilitu. Je založen na porovnávání bobtnání nemodifikovaného (referenčního) dřeva a modifikovaného dřeva. Pokud je bobtnání stejné index vyjde nulový. V případě že bobtnání vyjde nulové, index bude mít 100%.

Radiální (S_R), tangenciální (S_T), a objemové (S_V) bobtnání, (ASE) byly vypočteny po každém cyklu a stanoven dle vzorce (10)

$$S_{R,T,V}(\%) = \frac{V_1 - V_0}{V_0} * 100 \quad (10)$$

Kde S je radiální, tangenciální nebo objemové bobtnání [%], (V_1) je radiální, tangenciální nebo objemový rozměr po máčení [mm], a (V_0) je rozměr vzorku před máčením [mm]. Koeficient ASE byl vypočten dle vzorce (11)

$$ASE_V(\%) = \frac{S_u - S_m}{S_u} * 100 \quad (11)$$

ASE_V je koeficient objemového bobtnání [%], S_u je bobtnání (nemodifikovaného) dřeva [mm], a S_m je bobtnání modifikovaného dřeva [mm].

4.2.3.4 Statistické vyhodnocení

Vliv jednotlivých podmínek byl porovnán statisticky pomocí programu MS Excel verze 2013.

Průměrné hodnoty byly vypočítány dle následujícího vzorce.

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (12)$$

Kde \bar{x} je výsledná průměrná hodnota, x_i je zkoumaná hodnota a n je počet vzorků.

Informace o variabilitě souboru nám podává směrodatná odchylka, u souborů s normálním rozdělením četnosti platí, že v intervalech směrodatné odchylky okolo aritmetického průměru se nachází určitá část hodnot. Směrodatná odchylka je počítána dle následujícího vzorce.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (13)$$

Kde S je výsledná směrodatná odchylka, \bar{x} je průměrná hodnota, x_i je zkoumaná hodnota vlastnosti a n je počet vzorků.

K porovnání více vzorků s různou úrovní slouží variační koeficient, udává, z kolika procent se podílí směrodatná odchylka na aritmetickém průměru.

Variační koeficient je vypočítán dle následujícího vzorce.

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100 \quad (14)$$

Kde V je variační koeficient (%), S je směrodatná odchylka a \bar{x} je průměrná hodnota

5 Výsledky

5.1 Hmotnostní přírůst po impregnaci

Průměrné hodnoty hmotnostních přírůstků (WPG) byly 61,1% pro skupinu OL a 51,2% pro skupinu určenou pro tepelnou úpravu. Zároveň byla vypočítána retence, která dosáhla hodnot 384,8 kg/m³ a 330,9 kg/m³.

Tabulka 1: Srovnání hustot, hmotnostních přírůstků a příjmu impregnační látky.

skupina	Hustota (kg/m ³)	sm. odch.	var. koef.(%)	WPG (%)	sm. odch.	var. koef.(%)	Retence (kg/m ³)	sm. odch.	var. koef.(%)
(OL)	632,8	30,5	20,74	61,1	8,1	7,57	384,8	42,3	9,11
(OL+TM)	647,0	23,0	28,08	51,2	5,9	8,69	330,9	38,5	8,59

Tabulka 1. zobrazuje základní přehled a popisnou statistiku o měřených skupinách. Hustota první skupiny vzorků byla nižší o 2,24% v porovnání se skupinou 2. Příjem impregnační látky a retence byla u první skupiny vyšší o 19,6% a 16,3% oproti druhé testované skupině vzorků. Výsledky budou dále hodnoceny a diskutovány v kapitole 6.1.

5.2 Hmotnostní úbytek po tepelné modifikaci

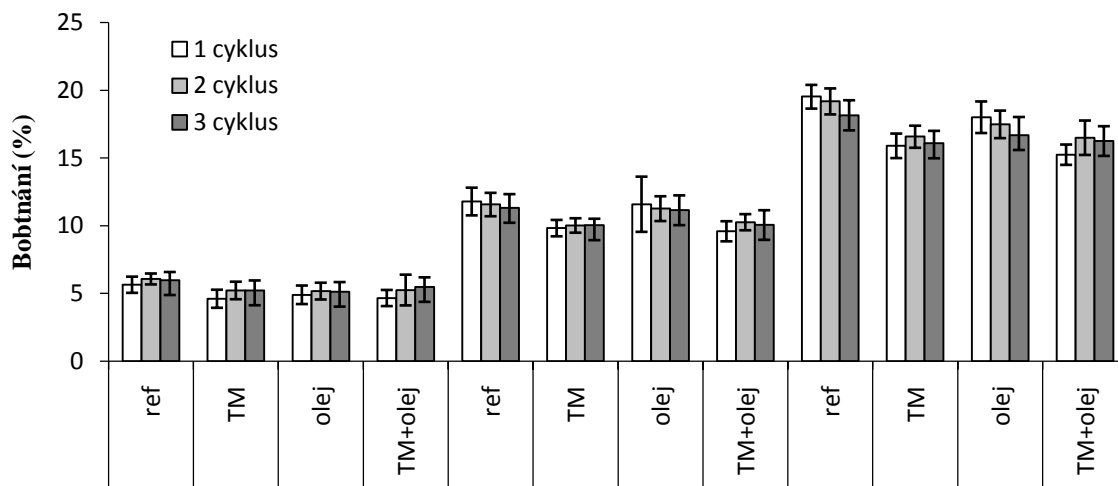
Po procesu tepelné modifikace byl vypočten hmotnostní úbytek, který odpovídá stupni degradace buněčné stěny dřeva. Hmotnostní úbytek byl 2,41% pro skupinu TM a u vzorků, které byly impregnovány, dosáhl hmotnostní úbytek průměrných hodnot 16,03%.

Tabulka 2. Srovnání hmotnostních úbytků s popisnou statistikou.

skupina	ML (%)	sm.odch.(%)	var.koef. (%)
TM	2,41	0,51	21,16
TM + olej	16,03	3,37	21,02

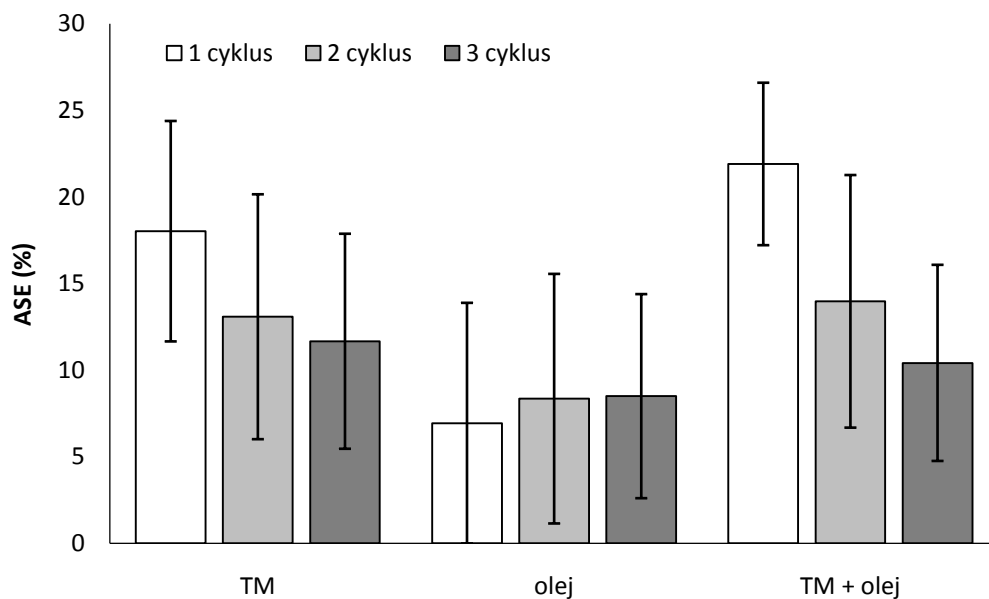
5.3 Bobtnání a efektivita omezení bobtnání (ASE)

Výsledky bobtnání po jednotlivých cyklech máčení a sušení jsou zobrazeny na Obr. 8. Můžeme pozorovat, že bobtnání je pro všechny skupiny nejmenší v radiálním směru a to přibližně poloviční než ve směru tangenciálním.



Obr.8 Bobtnání analyzovaných skupin v jednotlivých cyklech (referenční, tepelně upravené, impregnované a impregnované a poté tepelné modifikované.)

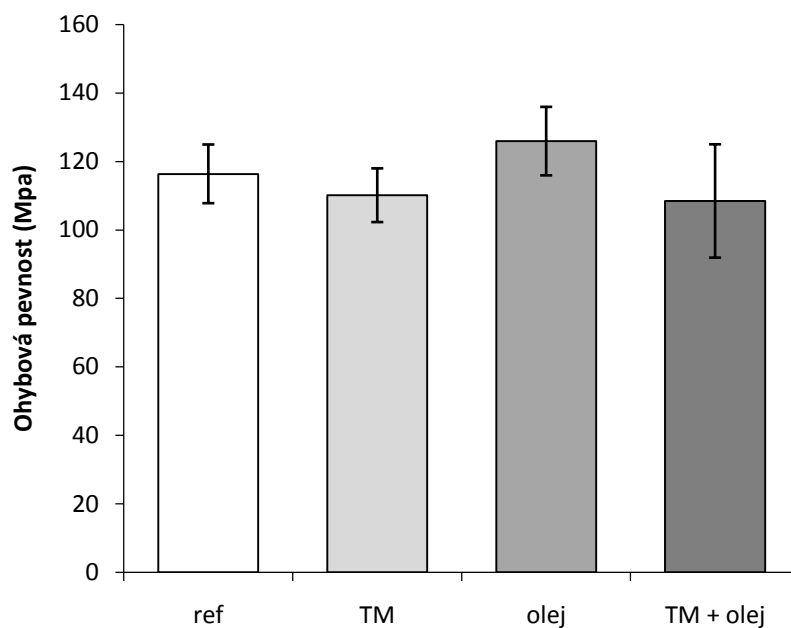
Nejvyšších hodnot bobtnání bylo dosaženo u referenčních vzorků a to zejména v prvních cyklech, kde radiální bobtnání bylo 5,6%, tangenciální 11,79% a objemové 19,53%. Oproti tomu nejmenších hodnot bobtnání dosahovaly skupiny tepelně modifikované TM a kombinace impregnace a tepelné modifikace (TM+OL). Při porovnání jednotlivých cyklů je možné sledovat nepatrné rozdíly v radiálním a tangenciálním bobtnání, objemové bobtnání pak vykazuje výraznější rozdíly. Možné důvody vedoucí k těmto změnám budou dále diskutovány v textu.



Obr.9 Efektivita omezení bobtnání (ASE) u analyzovaných skupin (referenční, tepelně upravené, impregnované přírodním olejem a kombinace impregnace s tepelnou modifikací.)

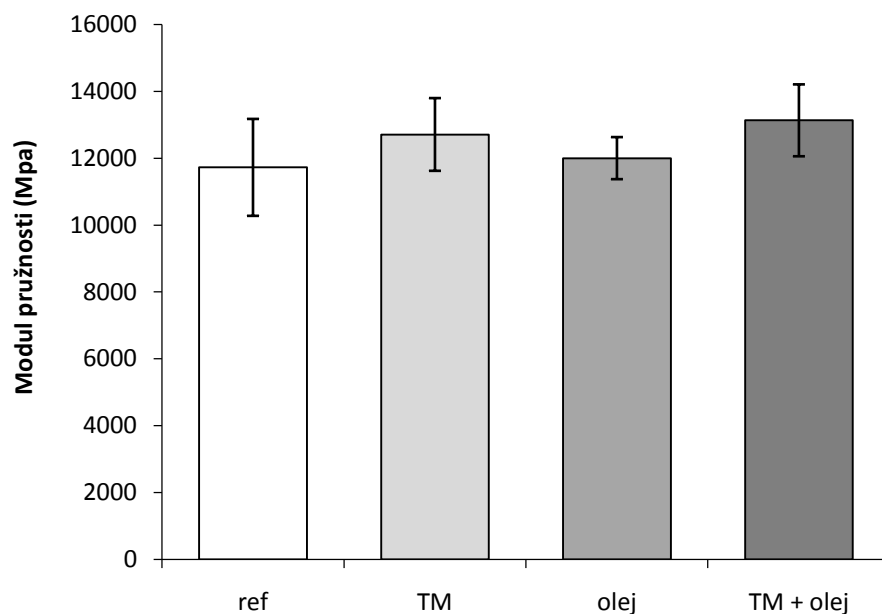
Koeficienty efektivity omezení bobtnání po 3 cyklech máčení jsou zobrazeny na Obr. 9. Hodnoty zobrazují vliv jednotlivých úprav na rozměrovou stabilitu dřeva. Výsledné hodnoty prokazují, že nejmenší účinnost omezení bobtnání má dřevo impregnované konopným olejem a to 7–8,5%. Tepelně modifikované dřevo prokazuje zvýšenou rozměrovou stabilitu o 18%. Nejlepších hodnot efektivity omezení bobtnání (22%) bylo dosaženo u vzorků, které byly impregnovány a následně tepelně modifikovány.

5.4 Pevnost ve statickém ohybu



Obr.10 Ohybová pevnost sledovaných skupin (referenční, tepelně upravené, impregnované přírodním olejem a kombinace impregnace a tepelné modifikace)

Výsledky ohybové pevnosti ve třibodém ohybu jsou zobrazeny na Obr. 10. Výsledná pevnost pro dřevo neupravené byla naměřena 116 MPa. U tepelně modifikovaných vzorků došlo k poklesu o 5,2% na průměrnou pevnost 110 MPa. U impregnovaných vzorků bylo dosaženo vyšší průměrné pevnosti o 9% v porovnání se vzorky neupravenými. U kombinace impregnace a tepelné modifikace bylo dosaženo průměrné pevnosti 108,5 MPa, odpovídající poklesu 7,5%. Variabilitu výsledků zobrazují směrodatné odchylky.



Obr.11 Modul pružnosti u analyzovaných skupin (referenční, tepelně upravené, impregnované přírodním olejem a kombinace impregnace a tepelné modifikace.)

Jak je možné vidět na sloupcovém grafu (Obr. 11), všechny zvolené druhů modifikací vedly ke zvýšení modulu pružnosti oproti kontrolním vzorkům, kde bylo dosaženo 11725 MPa. Nejvyšších průměrných hodnot modulu pružnosti bylo dosaženo u vzorků, kde byla kombinována impregnace a tepelná modifikace a to 13132 MPa, což je o 10,71% více než u referenčních vzorků. U tepelně modifikovaných vzorků bylo dosaženo modulu pružnosti 12709 MPa, což je o 8,39% více než u referenčních vzorků. U impregnovaných vzorků bylo dosaženo modulu pružnosti 12001 MPa, což je o 2,3% více než u referenčních vzorků. Variabilitu výsledků zobrazují v grafu chybové úsečky.

5.5 Barevná změna

Výsledky barevné změny potvrdily, že bylo dosaženo rozdílu barvy u všech typů modifikací. Rozdíly v jednotlivých barevných osách jsou popsány v Tabulce 3. Na první ose světlosti L^* můžeme vidět, že nejvyšších hodnot, tedy nejvyšší světlosti, má skupina referenčních vzorků. Pokles světlosti o 41% byl naměřen u vzorků impregnovaných i tepelně modifikovaných. Nejnižších hodnot světlosti dosáhla skupina vzorků kombinace impregnace a tepelné úpravy a to 39 což je o 74% méně než referenční vzorky. V ose a^* která zobrazuje červenou proti zelené, nejnižších hodnot tedy nejvíce do zelena dosáhla referenční sada, všechny metody modifikace prokázaly změnu do červených odstínů o cca 25%. V ose b^* opět nejnižších hodnot, tedy nejméně odstínů žluté, dosáhla referenční sada vzorků. Všechny modifikace dosáhly podobný hodnot posunu směrem ke žluté barvě o 11,5%.

Tabulka 3: Porovnání změn v jednotlivých osách barevnosti

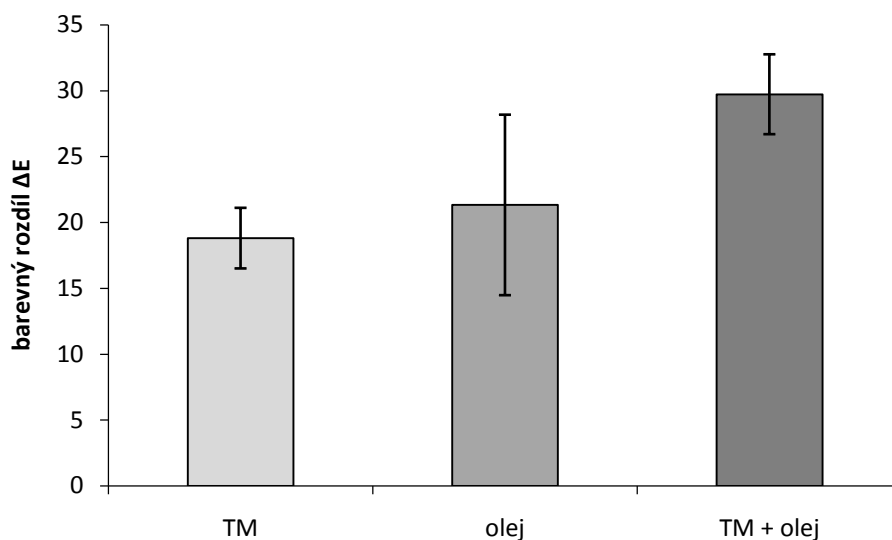
	referenční	TM	olej	TM + olej
L^*	68,33 (1,209)	49,83 (2,561)	47,89 (7,033)	39,06 (3,085)
a^*	7,29 (0,448)	9,21 (0,43)	11,11 (0,762)	10,95 (0,967)
b^*	18,89 (1,13)	20,15 (1,419)	21,04 (3,504)	21,036 (3,262)

* směrodatné odchylky uvedeny v závorkách (%)

Skupiny vzorků představující jednotlivé úpravy (referenční, tepelně modifikované, impregnované a kombinace) a jejich barevná změna je zobrazena na Obr. 12.



Obr.12 Vizuální porovnání barvy zkušebních vzorků po jednotlivých stupních úpravy.



Obr.13 Barevná změna u analyzovaných skupin (referenční, tepelně upravené, impregnované přírodním olejem a kombinace impregnace a tepelné modifikace.)

Výsledky barevné změny (Obr. 13) potvrdily, že největší barevný rozdíl oproti referenčním vzorkům dosáhla kombinace impregnace a tepelné modifikace a to o 29,7 bodu, o něco méně bylo naměřeno u impregnovaných vzorků a to o 28,3% oproti kombinaci. Nejmenších barevných změn bylo zaznamenáno u tepelně modifikovaných vzorků a to 18,8 bodu což je o 36% méně, než u vzorků kde byla provedena kombinace modifikací dřeva. Variabilitu výsledků zobrazují chybové úsečky.

6 Diskuze

6.1 Příjem impregnační látky

Obsah impregnační látky obsažené v testovaných vzorcích (WPG) byl v rozmezí 50-60%. Tyto výsledky prokazují, že dřevo buku použité na experimenty bylo poměrně bez vad a nepravého jádra, jinak by nebyl příjem impregnační látky tak vysoký. Rozdílný příjem v jednotlivých skupinách je pravděpodobně dán přirozenou variabilitou dřeva, tj. rozdílnou hustotou jednotlivých skupin.

6.2 Hmotnostní úbytek

Dalším měřeným parametrem byl hmotnostní úbytek po tepelné úpravě, vzorky, které byly tepelně modifikovány, vykazují hmotnostní úbytek 2,41% po 3 hodinách, což je v souladu s odbornou literaturou. Obecně je uváděn hmotnostní úbytek minimálně od 2 do 4%, aby bylo dosaženo významnějších změn ve vlastnostech dřeva. Ferrari (2012) uvádí hmotnostní úbytek 2,3% pro dřevo buku, což prokazuje shodu s naměřenými daty. U vzorků impregnovaných přírodním konopným olejem došlo k hmotnostnímu úbytku 16,03%. Toto bylo pravděpodobně způsobeno ztrátou (vytlačení) oleje ze vzorků během procesu tepelné modifikace. O tomto svědčí i fakt, že určité množství oleje bylo možné pozorovat v prostoru komory po dokončení procesu tepelné modifikace. Tomuto by bylo možné předejít optimalizací procesu impregnace, tj. vytvoření končeného podtlaku a snížení tak příjmu impregnačního oleje (WPG).

6.3 Bobtnání

Hodnoty konečného bobtnání dřeva prokazují, že tepelná modifikace dřeva vedla se ke snížení počet volných hydroxylových skupin (OH-), na které se váží molekuly vody. V důsledku degradace složek dřeva (především hemicelulóz) došlo ke snížení bobtnání ve všech anatomických směrech (radiální, tangenciální, objemové) oproti referenčním vzorkům. Největší rozdíl byl zaznamenán v objemovém bobtnání, kde referenční vzorky dosáhly 20% nabobtnání oproti suchému stavu, tento jev byl v průběhu jednotlivých cyklů podobný. Tepelně modifikované vzorky a kombinace impregnace a tepelné modifikace dosahovaly nabobtnání okolo 15% oproti absolutně suchému stavu. Zde byl nepatrný nárůst bobtnání při druhém cyklu a při třetím už je rozdíl téměř zanedbatelný. Důvodem je nejspíš vyluhování nově vniklých extraktivních

látek během procesu tepelné modifikace. Máčení vzorků mohlo vést k vyluhování těchto extraktivních látek, které uvolnily místo v mezifibrilních prostorech pro další molekuly vody. Giebeler (1983) prokázal pokles bobtnání mezi 50% až 80% pro dřevo buku, topolu, borovice, smrku a břízy upravených při teplotě mezi 180°C až 200°C v atmosféře inertního plynu.

Impregnované vzorky dosáhly hodnot bobtnání vyšších než tepelně modifikované vzorky nebo kombinace, ovšem stále o 2% méně než jakých hodnot dosáhly referenční vzorky. Tento jev mohl být způsoben impregnačním olejem, který má jisté hydrofobní vlastnosti a zabraňuje pronikání vody do struktury dřeva.

6.3.1 Koeficient efektivity omezení bobtnání

Koeficient efektivity omezení bobtnání (ASE) byl hodnocen na základě výsledků bobtnání. ASE koeficient je obecně označován za indikátor rozměrové stability modifikovaných materiálů. Na Obr. 7 je možné pozorovat, že nejvyšších hodnot koeficientu ASE bylo dosaženo u vzorků kombinace impregnace a tepelné modifikace a to téměř 22%, podobných hodnot, ovšem o něco nižších dosáhly i vzorky pouze tepelně modifikované 18,2%, což je dáno, snížením hydroxylových skupin ve dřevě. Tyto poměrně vysoké hodnoty omezení bobtnání se v jednotlivých cyklech máčení snižovaly až na hodnoty 10,4% u kombinace a 11,6% u tepelně modifikovaných. Jak již bylo dříve zmiňováno v textu, tento jev mohl být způsoben vyluhováním extraktivních látek do vody během máčení i vyluhováním určitého množství naimpregnovaného oleje. Zvláštní výsledky nám poskytla skupina impregnovaných vzorků. Kdy bylo dosaženo koeficientu omezení bobtnání v prvním cyklu 6,9%, ovšem v dalších cyklech se tento koeficient mírně zvýšil na 8,4% a zde zůstal prakticky neměnný. Mohlo dojít k chybě v měření při prvním cyklu, kdy byly vzorky vysušeny na 0% vlhkost, a bylo patrné, že přírodní olej byl „vytlačen“ na povrch, kde vytvořil vrstvu vysušeného oleje, čímž ovlivnil přesnost měření. Po prvním máčení bylo již patrné, že se přebytečný olej z lumenu buněk a povrchu vyluhoval do vody a povrch byl již čistší a kvalitnější pro měření. Studie potvrdila, že pro dřevo buku (*Fagus sylvatica* L.), a borovice (*Pinus sylvestris* a *Pinus radiata*) při stejných podmínkách byla hodnota ASE v radiálním směru 10%, 33% a 35% a v tangenciálním směru 13%, 41% a 40%. (Militz 2002). Údaje po 3 cyklu jsou pokládány za ustálené, ovšem lze očekávat, že při pokračování a opakování dalších cyklů by mohlo dojít k dalším změnám hodnot koeficientu omezení bobtnání. Čermák et. al (2015) se také zabýval koeficientem omezení bobtnání

v jednotlivých cyklech a v tomto případě se koeficient ASE postupně snižoval až se v 5 cyklu ustálil. Výsledky ASE vykazují poměrně velkou variabilitu dat, což dokazují hodnoty směrodatných odchylek vyjádřených chybovými úsečkami.

6.4 Ohybová pevnost

Při měření ohybové pevnosti bylo u referenčních vzorků dosaženo hodnot 116 MPa při 0% vlhkosti. Tyto výsledky se shodují s odbornou literaturou, která uvádí pro buk při vlhkosti 12% 109 MPa (Ugolev 1986). U tepelně modifikovaných vzorků i u kombinace impregnace s tepelnou modifikací se mez pevnosti snížila o 5,2% a 7,5%. Čermák et al. (2013b) také měřil pevnost v ohybu u bukového tepelně modifikovaného dřeva a jeho hodnoty udávají 111 MPa při 200 °C, což souhlasí výsledky uváděnými v této práci. Naopak zvýšení meze pevnosti ve statickém ohybu bylo naměřeno u impregnovaných vzorků a to o 9% oproti referenčním vzorkům. Jedním z možných důvodů tohoto zvýšení je množství impregnačního oleje, který se nacházel v lumenech buněk. Díky přítomnosti oleje a jeho charakteru, tj. nestlačitelnost, lze předpokládat zvýšení pevnosti v tlaku. Vzhledem k tomu, že namáhání v ohybu je kombinace tahu a tlaku, lze předpokládat, že olej napomohl většímu odporu vůči deformaci a tím došlo ke zvýšení meze pevnosti v ohybu. Tuto teorii by bylo vhodné dále analyzovat a provést další testy mechanických vlastností.

6.5 Modul pružnosti

U všech metod modifikace byl zaznamenán nárůst modulu pružnosti oproti referenčním vzorkům. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti bylo dosaženo u kombinace impregnace a tepelné modifikace a to o 10,71% oproti referenčním vzorkům. Tepelně modifikované vzorky dosáhly zvýšení o 8,39% a impregnované dosáhly zvýšení pouze 2,3% oproti referenčním vzorkům. Esteves et al. (2007b) uvedli při výzkumu tepelné modifikace dřeva borovice, že do úbytku hmotnosti cca 4% se zvyšuje modul pružnosti. Toto tvrzení se potvrdilo i u námi měřeného materiálu. U impregnovaných vzorků má zřejmě vliv na zvýšení hodnoty modulu pružnost opět olej v lumenech buněk, který jako nestlačitelná tekutina zabraňuje deformaci buněk.

6.6 Barevné změny

Měření barvy bylo provedeno pomocí spektrofotometru, který převedl barvu do 2 chromatických os a jedné osy určující světlost. Celkový rozdíl ΔE^* představuje posun barvy v souřadném systému oproti referenčním vzorkům. Největšího barevného rozdílu bylo dosaženo u vzorků, kde se kombinovala impregnace a tepelná modifikace, tento rozdíl byl 29,7. Podstatně menší barevný rozdíl byl zaznamenán u vzorků pouze tepelně modifikovaných a to 18,7 což je o 36% méně než u kombinace úprav. Mezi těmito hodnotami se nachází odstín impregnovaných vzorků, který dosahuje 21,3 což je 28,3% méně než u kombinace modifikačních metod. Obecně lze říci, že na změnu barvy má při modifikaci největší vliv teplota, která zapříčinila největší barevný rozdíl. Barevný tón se v průběhu tepelné úpravy posouvá do modrých odstínů, což neznamená, že modrá, ale že ztrácí odstíny žluté, která je na opačné straně osy barevnosti. Barevná změna byla konstantní po celém průřezu. Jak uvádí mnoho autorů, dřevo tmavne s rostoucím časem a teplotou úpravy (Mitsui et al. 2001, Militz 2002). Teplota je pak považována za hlavní faktor (Hill 2006). Barevný rozdíl se dává za příčinu rozkladu hemicelulóz a tvorbě nových látek vzniklých jako vedlejší produkt degradace. Esteves et al. (2008) uvádějí, že barevné změny jsou pozorovány již při nízkých úbytcích hmotnosti (1-3%), a konečný výsledek závisí na rozsahu úpravy, druhu a chemickém složení modifikovaného dřeva.

6.7 Možnosti využití modifikovaného materiálu ve stavebních

Modifikované dřevo, jak již impregnované nebo tepelně upravené se dá využít ve stavebních a dalších konstrukcích a aplikacích. Díky zvýšené rozměrové stabilitě (ASE) prakticky u všech modifikovaných skupin lze konstatovat, že tato materiály se dají použít v prostředí s vyšším výskytem vlhkosti, jako jsou například prahy v dřevostavebních, kde dochází ke styku betonu s dřevem a toto místo je velmi náchylné. Dále je tyto materiály možné použít při výrobě stavebně truhlářských výrobků jako jsou okna a dveře, díky rozměrové stálosti by mohl zaručit kvalitnější doléhávání těsnění a výrobky s využitím tohoto materiálu by se daly vyrábět s vyšší přesností. Výroky využívající modifikované materiály (tepelně modifikované) pro výrobu vnějších částí vlysů na okenní rámy jsou již v současné době vyráběny. Dalšími možnostmi využití jsou obklady fasád budov, venkovní nábytek, terasy, atd. Obecně lze tento materiál využít všude tam, kde hrozí nebezpečí styku s vodou. Využití těchto výrobků by vedlo k prodloužení životnosti celé konstrukce. Z hlediska pevnosti došlo k mírnému snížení

hodnot, dané tepelnou degradací chemických složek dřeva. Tepelně upravené dřevo je obecně označováno za křehké, proto jej nelze doporučovat na konstrukční účely, kde dochází k velkému mechanickému namáhání. V našem případě nedošlo k výraznému poklesu, proto by bylo možné uvažovat o využití při konstrukcích s menším zatížením, například u vnitřních příček. Vzhledem k poměrně velkým barevným změnám ve dřevě by tento materiál mohl být vyhledáván jako okrasný prvek v interiéru a nahradit tak tropické druhy dřeva s výrazně vyššími pořizovacími náklady. Exteriérové využití těchto materiálů je podmíněno dalšími experimenty na odolnost vůči biologickým činitelům, přirozeného či umělého stárnutí dřeva.

7 Závěr

Vzhledem k výše uvedeným poznatkům a výsledkům lze usoudit, že stanovené cíle práce byly splněny.

Problematika vybraných modifikačních procesů, tj. impregnace dřeva a tepelná modifikace, byla nastíněna v literárním přehledu. Byl vytvořen přehled o postupech a využívaných látkách společně s jejich dopadem na konečné vlastnosti upravovaného materiálu. Zároveň byly řešeny dopady těchto metod na životní prostředí a použití ve výrobcích. Byly vysvětleny principy měření barvy a shrnuta charakteristika vlastností dřeva Buku.

Dřevo bylo podtlakově impregnováno a následně tepelně modifikováno dle postupů uvedených v metodice předkládané práce. Dále byly u modifikovaných vzorků měřeny fyzikální (bobtnání a barevné změny) a mechanické vlastnosti (ohybová pevnost - MOE a MOR). Výsledné hodnoty byly porovnány s referenční neupravenou sadou vzorků a odbornou literaturou.

Výsledky potvrdily očekávání při zlepšení sorpčních vlastností upraveného dřeva a zároveň ukázaly pokles mechanických vlastností (tepelně modifikované dřevo), tj. meze pevnosti a současně zvýšení modulu pružnosti je v souladu s uvedenou odbornou literaturou. Některá měření vykazují velké variabilitu dat, tento jev byl také okomentován a diskutován v kapitole 6.).

Hlavní myšlenkou této práce bylo analyzovat vliv impregnace dřeva na proces tepelné úpravy a tím způsobených změn ve vlastnostech jak fyzikálních tak i mechanických. Vliv impregnace dřeva na tepelnou modifikaci byl prokázán. Kombinace metod impregnace a tepelné modifikace by se dala využít na konstrukční účely nenosných prvků a také jako pohledové prvky díky své specifické barvě a materiálovým vlastnostem. Práci by se dalo rozšířit použitím různých typů olejů pro impregnaci dřeva (vysychavé, polovysychavé, nevysychavé), a také tepelnou modifikací při rozdílných teplotách (160°C, 220°C, 240°C) a časech. Pro komplexnější posouzení navrhovaného řešení by bylo vhodné práci dále rozšířit o další fyzikálně-mechanické vlastnosti dřeva (tvrdost, biologickou odolnost, umělé stárnutí, atd.)

8 Summary

Based on the above mentioned and discussed results and findings of the prosperities tested materials can be concluded that the results of the study have been met.

The issue of the selected modification process was outlined in the literary review. It was created an overview of the procedures and the used substances, together with their impact on the final properties of the modified material. Effects of these methods on the environment and use in products were dealt. They were explained the principles of the measurement of the color and summarized was also a study of the properties of the wood of beech (*Fagus sylvatica* L.).

Vacuum impregnation and thermal modification was carried out according to the procedures specified in the methodology, modified samples were measured on the characteristics of both the physical (swelling and color changes) and mechanical (bending strength, i.e. MOE and MOR). The results were compared with the reference untreated set of samples and literature.

The results confirmed the expectations in the improvement of the sorption properties of thermally modified wood and shown reduced mechanical properties, the bending strength and at the same time increase the elastic modulus, which agreement with the literature. There was for some of the measurements achieved by a large variability, this phenomenon was also commented in Chapter 6. For the completion of the overall report and of the measured materials would be needed to make additional measurements of other parameters.

The main idea of this work was to explore the effect of impregnation on the process of thermal modification, and caused changes in the properties of both the physical and the mechanical. It was found that a certain effect impregnation on thermal modification exists. The combination of the methods of impregnation and thermal modification can be used for design purposes of non-load bearing elements and also as the visual elements due to its specific color. Results should be further extended about variety of natural oils (dries, non-dries, etc.) as well as about thermal modification parameters (modification temperatures (160°C, 220°C, 240°C) and time. To provide more complex results, additional test of physical and mechanical properties should be carried out (biological durability, hardness, artificial weathering, etc.)

9 Použitá Literatura

- Boonstra, M., and Tjeerdsma, B. (2006). "Chemical analysis of heat-treated softwoods," *Holz Roh-Werkst.* 64, 204-211.
- Boonstra, M., Van Acker, J, Tjeerdsma, B., and Kegel, E. (2007a). "Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents," *Ann. Forest Sci.* 64, 679-690.
- Boonstra, M., Van Acker, J., and Kegel, E. (2007b). "The effect of a two-stage heat treatment process on the mechanical properties of full construction timber," *Wood Mater. Sci. Eng.* 2(3-4), 138-146.
- Bourgeois, J., Bartholin, M., and Guyonnet, R. (1989). "Thermal treatment of wood: Analysis of the obtained product," *Wood Sci. Technol.* 23, 303-310.
- Čermák, P. (2013a). Thermal modification of wood: process and properties. Disertační práce, Mendelova univerzita v Brně, 131 s.
- Čermák, P., Brabec, M., Milch, J. (2013b). Bending strength properties of wood thermally modified at 180 °C a 200 °C. In: Čermák, P. 2013. Thermal modification of wood: process and properties. Doctoral thesis, Mendel University in Brno, Czech republic.
- Čermák, P., Rautkari, P., Horáček, P., Saake, B., Rademacher, P., Sáblik, P.(2015). Analysis of dimensional stability of thermally modified wood affected by re-wetting cycles, *BioResources* 10(2), 3242-3253, DOI:10.15376/biores.10.2.3242-3253.
- Esteves, B., Domingos, I., and Pereira, H. (2007a). "Improvement of technological quality of eucalypt wood by heat treatment in air at 170-200°C," *For. Prod. J.* 57 (1/2), 47-52.
- Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I., and Pereira, H. (2007b). "Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood," *Wood Sci. Technol.* 41,193-207. DOI: 10.1007/s00226-006-0099-0.

- Esteves, B., Velez Marques, A., Domingos, I., and Pereira, H. (2008). "Heat induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood," *Wood Sci. Technol.* 42(5) 369-384. DOI : 10.1007/s00226-007-0157-2.
- Fengel, D., and Wegener, G. (1989). *Wood Chemistry Ultrastructure Reactions*, Walter de Gruyter.
- Giebeler, E. (1983). "Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/ Druck-Behandlung," *Holz Roh-Werkst.* 41, 87-94.
- Giebeler, E. (1983). "Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/ Druck-Behandlung," *Holz Roh-Werkst.* 41, 87-94.
- Hietala, S., Maunu, S., Sundholm, F., Jämsä, S., and Viitaniemi, P. (2002). "Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements," *Holzforschung* 56, 522-528.
- Hill, C. A. S. (2006): *Wood Modification - Chemical, Thermal and Other Processes* John Wiley & Sons, 2006, 239 s. ISBN 0-470-02172-1 978-0-470-02172-9
- Holan J., 2009. *Ochrana dřeva*, Brno, 91 s.
- Horáček P., 2008. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.*, 2. vyd. Brno MZLU, 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.
- Horák J. a kol., (1974). *Truhlář*, 3. vyd. Praha.
- Horský, D. (1987): *Hydrotermická úprava a ochrana dřeva*, část „Ochrana dřeva“. VŠLD Zvolen, 1987, 272 s.
- Inoue, M., Norimoto, M., Tanahashi, M., and Rowell, R. (1993). "Steam or heat fixation of compressed wood," *Wood Fiber Sci.* 25(3), 224-235.
- Kollmann F. F. P. (1951): *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Springer Verlag 1951
- Korkut, D., and Guller, B. (2008). "The effects of heat treatment on physical properties and Surface roughness of Red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood," *Bioresour. Technol.* 99, 2846–2851.
- Kubojima, Y., Okano, T., and Ohta, M. (2000). "Vibrational properties of heat-treated green wood," *J. Wood Sci.* 46, 63-67.

- Kuriál, P. (2002): Technologie II. – Restaurování nábytku a dřevěných výrobků. Střední a vyšší odborná škola uměleckých řemesel, Brno, 2002, 227 s.
- Militz, H. (2002). “Heat treatment of wood: European processes and their background,” In: *International Research Group Wood Pre*, Section 4-Processes, N° IRG/WP 02- 40241.
- Mitchell, P. (1988). “Irreversible property changes of small Loblolly Pine specimens heated in air, nitrogen, or oxygen,” *Wood Fiber Sci.* 20(3), 320-333.
- Mitsui, K., Takada, H., Sugiyama, M., and Hasegawa, R. (2001). “Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment: Part 1. Effect of treatment conditions on the change in color,” *Holzforschung* 55, 601-605.
- Novák P. Článek tepelná modifikace dřeva 2 díl [online] [citováno 23.04.2016] www.drevostavitel.cz/clanek/tepelna-modifikace-dreva-2-dil
- Raap, A, O. (2001): Review on heat treatments of wood. COST ACTION E22 Environmental optimisation of wood protection. Proceedings of Special Seminář, Antibes, France 2001
- Rowell, R. M. (2005). Handbook of wood chemistry and wood composites. Ed. R. M. Rowell. Florida: CRC Press. Pages 487.
- Silvia Ferrari , Ottaviano Allegretti , Ignazia Cuccui , Jakub Sandak , Anna Sandak (2012) Thermo-vacuum process for wood thermal modification: results for some European softwood and hardwood species treated at different conditions IVALSÀ-CNR Trees and Timber Institute-National research Council, San Michele all' Adige (TN), Italy
- Theomen, H. a kol. (2010). Wood-Based Panels. London, Brunel University Press, 283 s. ISBN 978-1-902316-82-6.
- Tiemann, H. (1920). Effect of Different Methods of Drying on the Strength and Hygroscopicity of Wood. 3rd Ed. “The kiln drying of lumber,” Chap. 11, J. P. Lippincott Co.
- Ugolev, V. N. (1986). Drevesinovedenije s osnovami lesnovo tovarovedenija. Moskva, 365 s.

- Weigl, M., Miller, U., Sommer, R., Hansmann, C. (2012): Ammonia vs. thermally modified timber—comparison of physical and mechanical properties. *Eur. J. Wood Prod.* (2012) s. 233–239. DOI 10.1007/s00107-011-0537-z
- Charrier, B., F. Charrier, G. Janin, D. P. Kamdem, M. Irmouli a J. Gonzalez. Study of industrial boiling process on walnut colour: Experimental study under industrial conditions. *Holz als Roh- und Werkstoff* [online]. 2002-8-1, roč. 60, č. 4, s. 259-264 [cit. 2015-10-11]. ISSN 00183768. DOI: 10.1007/s00107-002-0305-1. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article>