

Vliv tepelné modifikace na vybrané vlastnosti dřeva plantážově pěstovaného topolu

Diplomová práce

Vedoucí práce:

Ing. Petr Čermák, Ph.D.

Bc. Stanislav Horníček

Brno 2016

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Čermákovi, Ph.D. za podporu, odborné rady, připomínky a celkový přístup k mojí osobě, nejen během psaní této práce. Rád bych také poděkoval Dr. Peteru Rademacherovi za podnětné poznámky během konzultací a za pozornost, kterou mi věnoval při psaní předkládané práce. Velký dík patří také Bc. Petru Špatenkovi za poskytnutí materiálu na výzkum.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mě při tvorbě této práce podpořili, pomohli cennými radami a připomínkami, věnovali mi svůj čas a byli nápomocni při experimentech, a to kolegům a kamarádům z Ústavu nauky o dřevě, jmenovitě Janu Baarovi, Martinu Brabcovi, Jakubovi Döménymu, Radimu Rouskovi, Petru Pařilovi a Vojtěchu Koišovi.

Na závěr bych chtěl ještě vyjádřit velké díky mojí rodině, rodičům, bratrovi a babičkám za podporu během mého studia.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci: **Vliv tepelné modifikace na vybrané vlastnosti dřeva plantážově pěstovaného topolu** vypracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou *Směrnici o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 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 o tom, 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 6. dubna 2016

Jméno studenta: **Stanislav Horníček**
Název bakalářské práce: **Vliv tepelné modifikace na vybrané vlastnosti dřeva plantážově pěstovaného topolu**

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou procesu tepelné modifikace a posouzením možností využití dřeva plantážově pěstovaného klonu topolu s označením MAX-4 (*Populus Nigra* a *Populus maximowitzi*) s modifikovanými vlastnostmi ve výrobcích.

Náplní práce je přehled základních informací o běžně využívaných procesech tepelné modifikace a průzkum problematiky týkající se pěstování a materiálových vlastností dřeva plantážově pěstovaných dřevin, zejména rychle rostoucích hybridů topolu. Dále pak posouzení možností použití vybraného materiálu na výrobky na základě výsledků provedených experimentů vybraných fyzikálních a mechanických vlastností.

Hlavní myšlenkou předkládané práce je prozkoumat míru změny vlastností dřeva klonu topolu po aplikaci procesu tepelné modifikace. Dřevo plantážově pěstovaného topolu má velký potenciál pro budoucí využití. Modifikace jeho vlastností je možný způsob, jak tento levný a rychle rostoucí materiál využít pro vysoce jakostní materiály a zvýšit tak jeho užité vlastnosti.

Klíčová slova

Dřevo plantážově pěstovaného topolu, tepelná modifikace, rozměrová stabilita, ohybová pevnost, biologická odolnost, výrobky.

Name of student: **Stanislav Horníček**
The title of thesis: **The effect of thermal modification on selected properties of plantation grown poplar wood**

Abstract

The thesis deals with analyses of thermal modification process and assessment of the possibilities of using plantation grown poplar wood clone MAX-4 (*Populus Nigra* and *Populus maximowitzi*) with modified properties in wooden products.

Part of present thesis is to provide general state of art about recently developed thermal modification processes, research dealing with plantation grown wood species cultivation and its material properties, i. e. fast growing poplar hybrids mainly. Furthermore, assessment of possible use of thermally modified material for wooden products based on experimental results of physical and mechanical properties.

The aim of present thesis is to evaluate material properties of thermally modified fast growing poplar clone. Improvements within material properties of plantation grown poplar wood has a huge potential for future use of this low-cost, low durable and fast-grown wood and therefore increase its utilization within products made of wood.

Keywords

Plantation grown poplar wood, thermal modification, dimensional stability, bending strength, biological resistance, products.

Obsah

1	Úvod	9
2	Cíl práce	11
2.1	Dílčí cíle práce.....	11
3	Literární přehled	12
3.1	Tepelná modifikace dřeva.....	12
3.1.1	Procesy tepelné modifikace	12
3.1.1.1	ThermoWood proces	13
3.1.1.2	Plato proces	14
3.1.1.3	Menz Holz (OHT proces)	15
3.1.1.4	Rectification a Le Bois Perdure	15
3.1.1.5	WTT proces a Huber Holz	15
3.1.1.6	Royale proces	15
3.1.2	Změny vlastností dřeva během tepelné modifikace	16
3.1.2.1	Změna chemických vlastností dřeva během tepelné modifikace	16
3.1.2.2	Změna anatomických vl. dřeva během tepelné modifikace	18
3.1.3	Vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva.....	18
3.1.3.1	Fyzikální vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva	19
3.1.3.2	Mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva	20
3.1.4	Vliv na životní prostředí.....	21
3.1.4.1	Spotřeba energie	22
3.1.4.2	Znečištění vody	22
3.1.4.3	Znečištění vzduchu	22
3.1.5	Vývoj trhu a použití tepelně modifikovaného dřeva na výrobky	22
3.2	Pěstování dřevní biomasy na plantážích.....	24
3.2.1	Plantážově pěstované dřeviny a bioenergie	25
3.2.2	Plantážově pěstované dřeviny a stavební konstrukce	25
3.2.3	Vlastnosti dřeva plantážově pěstovaných dřevin.....	26
3.2.3.1	Fyzikální vlastnosti dřeva plantážově pěstovaných dřevin	26
3.2.3.2	Mechanické vlastnosti dřeva plantážově pěstovaných dřevin	28
3.2.4	Modifikace vlastností dřeva plantážově pěstovaných dřevin.....	28
3.2.4.1	Tepelná modifikace dřeva plantážově pěstovaných dřevin	28
3.2.4.2	Mechanická modifikace dřeva plantážově pěstovaných dřevin	29
3.2.4.3	Chemická modifikace dřeva plantážově pěstovaných dřevin	30

3.3	Plantážově pěstovaný topol	32
3.3.1	Plantážově pěstovaný topol v České republice.....	32
4	Materiál a metodika	33
4.1	Materiál	33
4.2	Výroba zkušebních vzorků	34
4.2.1	Tepelná modifikace	36
4.2.1.1	Modifikační režimy	36
4.2.1.2	Modifikační komora a řízení procesu	40
4.2.2	Zkušební vzorky	40
4.3	Výzkum vlastností materiálu	40
4.3.1	Výzkum fyzikálních vlastností materiálu.....	42
4.3.1.1	Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace	42
4.3.1.2	Hustota	42
4.3.1.3	Vlhkost	43
4.3.1.4	Bobtnání	43
4.3.1.5	Sesychání	44
4.3.1.6	Účinnost omezení bobtnání	44
4.3.1.7	Účinnost omezení sesychání	45
4.3.1.8	Ztráta hmotnosti vlivem vyluhování	45
4.3.2	Výzkum mechanických vlastností materiálu.....	46
4.3.2.1	Pevnost ve statickém ohybu	46
4.3.2.2	Modul pružnosti	47
4.3.2.3	Pevnost v tlaku podél vláken	47
4.3.3	Výzkum odolnosti materiálu vůči dřevokazné houbě	48
4.3.4	Statistické vyhodnocení.....	49
4.3.4.1	Průměrná hodnota	49
4.3.4.2	Směrodatná odchylka	49
4.3.4.3	Variační koeficient	50
4.3.4.4	Kontrola normality dat	50
4.3.4.5	Test shody středních hodnot výběrových souborů	50
5	Výsledky	51
5.1	Výsledky testů fyzikálních vlastností materiálu.....	51
5.1.1	Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace	51
5.1.2	Hustota	52
5.1.3	Rovnovážná vlhkost	53
5.1.4	Bobtnání a účinnost omezení bobtnání.....	55

5.1.5	Sesychání a účinnost omezení sesychání.....	58
5.1.6	Ztráta hmotnosti vlivem vyluhování	61
5.2	Výsledky testů mechanických vlastností materiálu.....	63
5.2.1	Pevnost a modul pružnosti ve statickém ohybu	63
5.2.2	Pevnost a modul pružnosti v tlaku podél vláken.....	65
5.3	Výsledky odolnosti vůči dřevokazné houbě	68
5.4	Přehled výsledků	70
6	Diskuze	71
6.1	Fyzikální vlastnosti materiálu	71
6.1.1	Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace	71
6.1.2	Hustota	72
6.1.3	Rovnovážná vlhkost	73
6.1.4	Bobtnání a účinnost omezení bobtnání	75
6.1.5	Sesychání a účinnost omezení sesychání.....	77
6.1.6	Ztráta hmotnosti vlivem vyluhování	77
6.2	Mechanické vlastnosti materiálu	79
6.2.1	Pevnost a modul pružnosti ve statickém ohybu	79
6.2.2	Pevnost a modul pružnosti v tlaku podél vláken.....	80
6.3	Odolnost vůči dřevokazné houbě.....	82
6.4	Výběr nejlepšího režimu úpravy	84
6.5	Posouzení možnosti využití materiálu na výrobky	84
7	Závěr	86
8	Summary	87
9	Literatura	88
	Seznam obrázků	106
	Seznam tabulek	110

1 Úvod

Dřevo je jedním z mála přírodních snadno obnovitelných materiálových zdrojů na naší planetě, ale i přes tuto vlastnost kdysi stálo v ústraní vůči dříve preferovanému těžkému průmyslu. V porovnání se strategickými surovinami jako je ropa, uhlí a zemní plyn, jejichž světové zásoby se kvůli narůstající spotřebě rychle tenčí, je dřevo při správném hospodaření takřka nevyčerpatelné. Taktéž rudy kovů, vápenc nebo keramické suroviny s obrovskými energetickými náklady na jejich těžbu a přeměnu v materiály užívané ve stavbách, kterými jsou ocel, beton nebo keramické tvárnice se vůbec nedají srovnat s minimální náročností zpracování stromů a následně i jejich dřeva. Navíc dřevo dosahuje výborného poměru pevnosti k nízké hustotě, a proto jej lze s výhodou použít v mnoha stavebních konstrukcích, jejich částí a doplňků (Havířová 2006). Mezi velké nevýhody dřeva ale patří anizotropní a nehomogenní charakter a hygroskopicitu, kvůli které je dřevo rozměrově nestabilní, mění svoje příčné rozměry v závislosti na vlhkosti prostředí.

Tyto vlastnosti můžeme eliminovat použitím vhodné technologie výroby nebo procesu úpravy dřeva, například využitím v oblasti aglomerovaných materiálů, kdy je dřevo dezintegrováno a následně spojeno dle navržených technologických postupů, anebo aplikováním speciálního procesu pro modifikaci přirozených vlastností dřeva. Procesů na úpravu vlastností dřeva je již na světě vyvynuto mnoho a zakládají se na různých principech. Mezi základní procesy modifikace dřeva patří chemická, tepelná a mechanická modifikace dřeva (Hill 2006). Dříve se používaly chemické látky, které jsou škodlivé lidskému zdraví i životnímu prostředí. Tyto látky byly díky zavádění ekologických norem a inovovaným technologiím nahrazeny šetrnějšími látkami a technologickými postupy. Dřeviny s méně jakostním dřevem upravené vhodným procesem tak může svými novými materiálovými vlastnostmi zastoupit dříve využívané dřevopro specifické výrobky nebo i materiály jiného charakteru.



Obr. 1 Rozlehlá plantáž hybridu topolů v Itálii (foto autor)

Zmiňovaným méně jakostním dřevem může být dřevo rychle rostoucích plantážově pěstovaných dřevin. Jedná se o způsob rychlého získávání dřevní biomasy nejen pro energetické účely, který se v dnešní době těší velkému zájmu a rozvoji po celém světě. Nejvíce se pěstují dřeviny vzniklé klonováním různých druhů topolů (tzv. japonské topoly). Takto vzniklé hybridy mají větší odolnost vůči biologickým škůdcům a výkyvům počasí, rychlejší růst a lepší parametry vlastností. Dále se pěstují jejich nativní kultivary, vrby, eukalypty, břízy, olše, osiky, akáty a další. Pěstování probíhá na uzavřených polích při husté osádce. Do deseti let se pak provádí sklizeň a zpracování dřeva. (Weger 2001; Weger a kol. 2015). Vlastnosti materiálu jsou ovlivněny charakterem pěstební činnosti. Vliv mají expozice pole, světová strana, složení půdy, vlhkost a také pozice konkrétního stromu na plantáži. Kvůli rychlému růstu materiál obsahuje velký podíl juvenilního dřeva, které je méně rozměrově stabilní a má nízkou hustotu, dále je součástí velký počet suků, vnitřní pnutí a točitost. Tyto nevýhody však převýší dnes zásadní výhody jako je cena tohoto dřeva a rychlost jeho získání od založení plantáže až po konečný materiál (Balantinecz et al. 2014). Jak již bylo řečeno, uvedené nevýhody lze výrazně vylepšit různými procesy modifikace dřeva.

Dřevo plantážově pěstovaných hybridů topolů má velký potenciál pro budoucí využití nejen jako palivo ale i na výroby v různých odvětvích průmyslu. Modifikování jeho vlastností je ten nejlepší způsob, jak tímto velmi levným a rychle rostoucím materiálem nahradit vysoce jakostní materiály a ušetřit je tak jen pro speciální účely.

2 Cíl práce

Cílem předkládané diplomové práce je analýza a optimalizace procesu tepelné modifikace dřeva plantážově pěstovaného topolu, analýza vlivu procesu tepelné modifikace na fyzikálně-mechanické vlastnosti dřeva a posouzení možností využití modifikovaného materiálu ve výrobcích.

2.1 Dílčí cíle práce

1. Provést literární rešerši z oblasti tepelné modifikace dřeva, plantážově pěstované dřevní suroviny a možností využití ve výrobcích
2. Tepelně modifikovat a analyzovat proces úpravy dřeva při teplotách 160 a 200 °C po dobu 2 a 4 hodin.
3. Analyzovat vliv tepelné modifikace na fyzikální vlastnosti – rovnovážná vlhkost, rozměrová stabilita, biologická odolnost, atd.
4. Analyzovat vliv tepelné modifikace na mechanické vlastnosti – ohybová pevnost, tlaková pevnost, atd.
5. Zhodnotit výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva topolu a případně navrhnout vhodné využití na výrobky

3 Literární přehled

3.1 Tepelná modifikace dřeva

Tepelná úprava je postup modifikace dřeva známý již z historického kontextu. Již v 8-11. století se opalovaly dřevěné kůly v ohni, aby se zvýšila jejich odolnost vůči povětrnostním vlivům a biologickým škůdcům. Prvním autorem v novodobé historii, který se zabýval působením vysokých teplot na dřevo a také prokázal zlepšení fyzikálních vlastností dřeva byl Tiemann (1920). V roce 1937 Stamm a Hansen publikovali výsledky experimentu, jehož cílem bylo snížení hygroskopicity dřeva (Hill 2006). Další rozvoj procesů tepelné úpravy dřeva následoval díky vývoji nových technologií po 60. letech 20. století. Konečným stupněm vývoje bylo uplatnění výrobků z modifikovaného dřeva na trhu a dostupnost běžným spotřebitelům.

3.1.1 Procesy tepelné modifikace

Již od počátku výzkumu vlivu tepelné úpravy na dřevo, bylo v 70. letech vyvinuto a publikováno několik metod a postupů (Seborg et. al. 1945, 1953; Burmester 1973a, b, 1975; Burmester and Wille 1976; Giebeler 1983). Postupné zvyšování zájmu o tepelně modifikované dřevo přispělo k vývoji finské značky ThermoWood (Jartek, Stellac, Valutec) (Viitanen et al. 1994; Viitaniemi et al. 1997). Původem z Holandska je Plato wood (Boonstra et al. 1998). Menz Holz proces je produktem německého výzkumu (Militz 2002), ve francouzské firmě Torrefaction byly vyvinuty dva procesy, a to Rectification a Le Bois Perdure (Weiland a Guyonnet 1997). Z Dánska pochází WTT proces a z Rakouska Huber Holz. Dnes je již ve většině vyspělejších zemí vyvíjen vlastní proces tepelné úpravy dřeva, optimalizovaný pro specifické aplikace (Hill 2006; Esteveira a Pereira 2009; Čermák 2013).

Díky velkému zájmu o materiál vyrobený pod obchodní značkou ThermoWood bylo po celém světě vybudováno několik výrobních závodů k jeho produkci. Hill 2006 uvádí, že výrobní závody byly postaveny v Estonsku, Rusku, Turecku a v Kanadě. Další procesy pro tepelnou úpravu dřeva byly vyvinuty v USA a také v Holandsku.

Hlavním parametrem, který způsobuje významné změny ve struktuře a chemickém složení dřeva je teplota. Nejvhodnější teploty pro tepelnou úpravu dřeva se nachází v rozmezí od 160 °C až 220 °C. Experimentálně bylo prokázáno, že teploty pod 140°C nemají zásadní vliv na změnu vlastností dřeva, ale při teplotách nad 260 °C již dochází k výrazné degradaci jeho struktury. Doba modifikace závisí na požadovaných konečných vlastnostech výsledného materiálu a pohybuje se v rozmezí od 15 minut do 24 hodin (Hill 2006). Při procesu tepelné úpravy je důležité zamezit vzplanutí dřeva v komoře v důsledku přístupu kyslíku využitím tzv. inertní atmosféry (dusík, vodní pára, oleje atd.), vakua nebo podtlaku v zařízení na úpravu dřeva (Militz 2002).

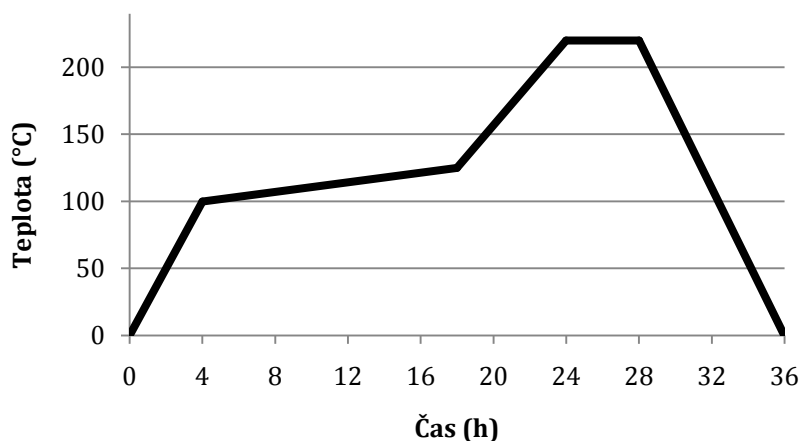
Tepelnou modifikaci dřeva je možné využít pro úpravu všech druhů dřeva. Vzhledem k charakteru procesu, dřevo po úpravě získává tmavší barevný odstín,

což konečný materiál může ztráknout. Upravené dřevo bývá ale také cítit spáleninou. Dále se sníží pevnost a tvrdost, ale tato skutečnost nemá zásadní vliv při použití tepelně upraveného dřeva na výrobky, které nejsou mechanicky namáhány (Militz 2002; Hill 2006).

3.1.1.1 *ThermoWood proces*

Proces ThermoWood je z hlediska tepelné modifikace dřeva průkopnický. Vyvinut byl ve Finsku a patentován v roce 1997 (Viitaniemi et al. 1997). Na vývoji se podíleli celkem tři instituce (Finské technické výzkumné centrum, Institut environmentálních technologií v Mikkeli a Technická univerzita v Tampere), které velmi úzce spolupracovali s firmami na zpracování dřeva. V současné době se jedná o nejúspěšnější proces tepelné úpravy dřeva. Značka je registrovaná v Evropské unii a vlastní jí Finská asociace Thermowood (FTWA) (Čermák 2013).

Proces probíhá v prostředí přehřáté vodní páry s obsahem kyslíku maximálně 3 až 5 %, pod atmosférickým tlakem a s rychlostí proudění vzduchu do 10 m/s. Toto prostředí je inertní a zabraňuje zahoření upravovaného dřeva během procesu (Syrjänen a Kangas 2000).



Obr. 2 Schéma procesu tepelné úpravy dřeva ThermoWood (Reinprecht 2008)

ThermoWood proces probíhá ve třech fázích. První fází je sušení dřeva při vysoké teplotě, tj. "vysokoteplotní sušení". Teplota v komoře díky horké páře rychle stoupne na 100 °C. Poté se dále pozvolně zvyšuje až k 130 °C, při čemž dochází ke snížení vlhkosti obsažené ve dřevě na hodnotu blízkou 0 %. Dalším stupněm je vlastní modifikace – "tepelná modifikace". Teplota v komoře se zvýší na 185 až 230 °C a poté je udržována po dobu nutnou k požadovanému stupni konečné tepelné modifikace (nejčastěji 2–4 hod), dané konečným použitím výrobku. Poslední fáze, "chlazení a klimatizování", probíhá při postupném ochlazení komory, pomocí systému chladících trysek na teplotu 80–90 °C. V této části je zvlhčování důležité pro konečné využití dřeva, které je dáno vlhkostí materiálu nad 4 %.

3.1.1.2 *Plato proces*

Jedná se o inovativní metodu tepelné modifikace dřeva, která byla vyvinuta v Holandsku. Základy této dvoustupňové metody položil v roce 1989 Ruyter. Provedl několik experimentů v laboratořích Koninklijke Shell Amsterdam (KSLA) a podle získaných výsledků stanovil hlavní podmínky úpravy. První výrobní závod produkující dřevo upravené Plato procesem byl postaven v roce 2000 ve městě Arnhem a nazýval se Plato Holand Production BV a vyráběl PlatoWood pro Holandský a Německý trh. V roce 2001 byl však uzavřena kvůli několika chybám v řízení podniku (Čermák 2013).

Zvyšující se poptávka po tepelně modifikovaném dřevě však způsobila obnovení výzkumu a produkce materiálu PlatoWood. Proces byl navržen jako dvoustupňový s relativně nízkou teplotou (< 200 °C). Další podmínky při úpravě dřeva jsou optimalizovány v závislosti na požadovaných vlastnostech výsledného materiálu (Militz a Tjeerdsma 2000; Čermák 2013).



Obr. 3 Nerezový reaktor pro hydrotermolýzu dřeva (PlatoWood)

V rámci dvoustupňového Plato wood procesu můžeme rozlišit pět rozdílných stupňů modifikace (Boonstra 2008). V prvním stupni dojde v konvenční sušárně k předsušení dřeva navlhkost 14–18 %. Dalším stupněm je hydrotermolýza, kdy je dřevo zahřáto v nerezovém reaktoru s vodním prostředím na 150–180 °C pod atmosférickým tlakem a nasycenou vodní párou. Třetím stupněm je vysušení materiálu v konvekční sušárně na vlhkost 8–9 %. Poté se materiál znovu zahřeje ve speciální nerezové sušárně na 150–190 °C a to bez zvláštní inertní atmosféry. Poslední fází je klimatizování materiálu na vlhkost vhodnou pro další zpracování, která je 4–6 %. Klimatizování se provádí ve stejné konvenční sušárně jako sušení dřeva. Díky dobré propracovanosti procesu a zvládnutí technologie má výsledný materiál výborné materiálové vlastnosti.

3.1.1.3 Menz Holz (OHT proces)

Tato metoda tepelné úpravy dřeva byla vyvinuta v Německu Prof. Dr. A. Rappem ve spolupráci s Federálním Výzkumným Centrem pro Lesnictví a Les sídlící v Hamburku. Zkratka OHT znamená spojení „Oil Heat Treatment“ – úprava horkým olejem. Proces byl po dobu patnácti let testován na trhu a neustále optimalizován (Vernois 2004; Čermák 2013).

Německý postup tepelné úpravy dřeva je rozdílný z důvodu použití přírodního lněného oleje a vysoké teploty. Proces OHT používá uzavřený autokláv naplněný horkým olejem. Vlastní úprava trvá od 2 do 4 hodin a celý proces asi 18 hodin, včetně zahřívání a chlazení (Rapp a Sailer 2000).

Proces lze rozdělit na tři hlavní fáze. První fází je zahřívání, kdy při OHT procesu je autokláv téměř skoro naplněn přehřátým přírodním olejem. Dále následuje stupeň vysokoteplotního ohřevu dřeva na teplotu 210 až 220 °C. Po této vlastní úpravě následuje poslední fáze, kdy je olej odčerpán, dřevo schlazeno a klimatizováno uvnitř autoklávu. Celý proces tepelné úpravy dřeva (zahřívání-úprava-ochlazování) trvá asi 20 až 40 hodin (Čermák 2013).

3.1.1.4 Rectification a Le Bois Perdure

Rectification proces (Rectified wood – Opravené dřevo) byl vyvinut na Ecole des Mines v Sant-Etienne. Veškeré patenty, provozní licence a výrobní know-how byli získány firmou NOW (New option wood – Retitech) v roce 1997. Dřevo před-sušené na 12% vlhkost je pomalu zahříváno ve speciální komoře na 210 až 240 °C. Inertní atmosférou je v tomto případě dusík s minimálním obsahem kyslíku (asi do 2 %) (Vernois 2001).

Le Bois Perdure vyvinula francouzská firma BCI v polovině 90. let a ke komerčnímu použití byl proces uzpůsoben firmou PCI z Quebecu. Tato technologie také zahrnuje tepelnou úpravu dřeva ve speciálních podmínkách pod inertní atmosférou. Při procesu dochází k vysušení a následnému ohřátí dřeva na 200 až 230 °C, a to za pomoci horké vodní páry a spalin vzniklých slabou pyrolýzou dřeva (Esteves a Pereira 2009).

3.1.1.5 WTT proces a Huber Holz

WTT proces byl vyvinut v Dánsku. Zkratka WTT znamená „Wood Treatment Technology“ – technologie úpravy dřeva. Modifikace probíhá při teplotách 160–180 °C.

Proces Huber Holz pochází z Rakouska a využívá teploty 170–230 °C. Oba procesy používají horkou vodní páru jako inertní prostředí. Při WTT procesu je možné použít kombinaci s oleji (Čermák 2013).

3.1.1.6 Royale proces

Původně se jedná o metodu vyvinutou pro sušení řeziva, kdy je dřevo ve vakuu zahřáto v oleji. V porovnání s jinými procesy je použita nízká teplota (60–90 °C) ale

díky tomu nedochází k degradaci oleje a nutnosti jeho výměny. V tomto případě se jedná o nepřímou modifikaci, protože olej nepenetruje buněčnou stěnu.

Počáteční fází procesu je uložení vlhkého řeziva do modifikační komory, která se naplní olejem. Poté dojde k jeho zahřátí na požadovanou teplotu a navození vakua. Voda uvolňující se z řeziva je v podobě vodní páry odváděna pryč pomocí odsávacího systému. Ve chvíli dosažení požadovaného obsahu vlhkosti je olej z modifikační komory vypuštěn.

Díky oleji se na povrchu dřeva vytvoří hydrofobní vrstva, která zamezuje vniknutí vody a způsobuje tak větší rozměrovou stabilitu (Hill 2006).

3.1.2 Změny vlastností dřeva během tepelné modifikace

Během tepelné modifikace dřeva dochází k nevratným změnám v chemickém složení, a to zejména degradaci chemických složek buněčné stěny a extraktivních látek. Míra těchto změn během úpravy je velmi závislá na teplotě a na době jejího působení. Teplota je hlavním a rozhodujícím faktorem při tepelné úpravě dřeva a pro jeho následné vlastnosti (Bourgois et al. 1989; Hill 2006).

V prvotních fázích tepelné úpravy při 20–150 °C dochází k vysychání struktury dřeva, hlavně vody volné. Při teplotách vyšších, 180–260 °C, je již dřevo tepelně upravováno s následkem nevratných změn v jeho chemické a anatomické struktuře. Teploty nad 300 °C jsou pak pro strukturu dřeva destruktivní. (Hill 2006; Čermák 2013; Sandberg a Kutnar 2016).

3.1.2.1 Změna chemických vlastností dřeva během tepelné modifikace

Po chemické stránce může být dřevo charakterizováno jako biopolymerní kompozit skládající se ze tří základních komponent (celulóza, hemicelulóza a lignin) a akcesorických látek (extraktivní a anorganické látky) (Rowell 2005).

Buňky dřeva obsahují hlavně polymery na bázi cukrů (polysacharidy 65–75 %) v kombinaci s ligninem (18–35 %). Jednoduchou chemickou analýzou můžeme rozlišit dřevo listnáčů a jehličnanů ale nelze tímto způsobem identifikovat jednotlivé dřeviny kvůli rozdílnostem v obsahu chemických látek v jejich dřevě. Jehličnaté dřeviny mají ve dřevě vyšší obsah celulózy (40–45 %) a ligninu (26–34 %) ale méně pentozanů (7–14 %) oproti dřevu listnatých dřevin, které mají obsah celulózy 38–49 %, ligninu 23–30 % a pentozanů 19–26 % (Čermák 2013).

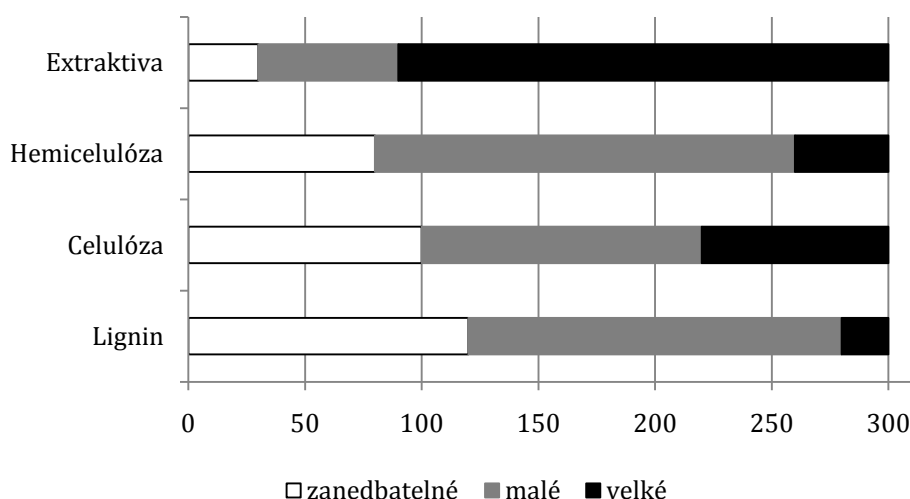
První chemickou složkou dřeva, která podléhá termodegradaci, je hemicelulóza. Její rozklad probíhá už při 140–260 °C. Při zahřívání dřeva vzniká z kyselinových složek hemicelulózy pomocí hydrolýzy kyselina octová. Tato kyselina slouží jako katalyzátor hydrolýzy hemicelulózy na rozpustitelné cukry. V návaznosti na tento proces dochází také k depolymerizaci celulózy v amorfních částí mikrofibril (Shafizadeh a Chin 1977; Tjeerdsma et al. 1998a; Sivonen et al. 2002; Nuopponen et al. 2004). Výsledkem je degradace složek celulózy a rozbití jejích řetězců na kratší. Vlivem tepelné modifikace se tedy konstantně snižuje obsah hemicelulózy ve dřevě. Výsledkem této chemické změny je zvýšení odolnosti

vůči dřevokazným houbám v porovnání s běžným dřevem. Způsobeno je to především snížením počtu hydroxylových (OH-) skupin, které váží molekuly vody. Tepelně modifikované dřevo je díky těmto změnám také rozměrově stabilnější.

Celulóza je vůči zvýšeným teplotám více odolná a to zejména díky krystalické složce, která se zvyšuje degradací její amorfni části. Řetězce celulózy jsou spojeny již zmiňovanými můstky mezi hydroxylovými skupinami. Rozpad celulózy probíhá při teplotách 230–350 °C, kdy dochází k depolymerizaci řetězců odstraněním vody a vývoji volných radikálů, např. karbonylových a karboxylových skupin, peroxidu vodíku a také oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a reaktivního dřevěného uhlí.

Nejvyšší odolnosti vůči působení tepla, z chemických strukturálních složek dřeva, dosahuje lignin. Degradace začíná, při překročení 200 °C. Při degradaci dochází k rozbití vazeb B-aryl éteru a přeměně částic ligninu kondenzací na jednotky difenylmethanového typu. Tyto změny probíhají už při teplotách 120–220 °C. Výsledkem je změna vlastností ligninu a to hlavně jeho barvy, reaktivnosti a rozpustitelnosti.

Doprovodné složky dřeva, extraktivní látky, nejsou jeho strukturální složkou. Většina z nich degraduje při procesu tepelné modifikace dřeva, kdy se vypaří nebo se objeví v podobě nehořlavých zbytků – popela.



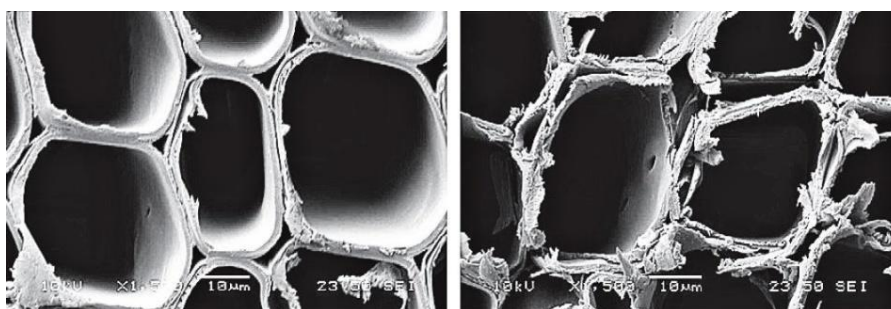
Obr. 4 Názorné zobrazení změn složek dřeva pod vlivem teploty bez ohledu na čas (Sandberg a Navi 2011)

3.1.2.2 Změna anatomických vlastností dřeva během tepelné modifikace

Během procesu tepelné modifikace se chovají dřeva jehličnanů a listnáčů rozdílně. Anatomická struktura dřeva jehličnatých dřevin je podstatně jednodušší než v případě dřeva dřevin listnatých. Obsahuje hlavně tracheidy (90–95 %), dřevné paprsky (5–10 %) a pryskyřičné kanálky (0,5–1 %). Dřevo listnatých dřevin má anatomickou strukturu složitější, protože obsahují více elementů – tracheidy a librifornní vlákna (36–70 %), cévy (20–55 %), dřevné paprsky (6–20 %) a parenchymatické buňky (do 2 %) (Šlezingerová a Gandelová 1999; Čermák 2013).

Působením vysokých teplot mohou vznikat ve dřevě nebo na jeho povrchu poškození, například trhliny, kolaps buněk anebo různé tvarové deformace. Důvodem k těmto poškozením jsou chemické změny a fyzikální pochody uvnitř dřeva vznikající během tepelné modifikace. Míra a povaha těchto defektů je závislá na podmínkách procesu modifikace a druhu dřeva (Boonsra et al. 2006a, 2006b). Fengel a Wegener (1989) zkoumali pomocí elektronového mikroskopu dřevo smrku, tepelně modifikované teplotou 150 °C, a našli trhliny mezi S1 a S2 vrstvou buněčných stěn (Fengel 1966a, 1966b; Filló a Peres 1970; Gromov et al. 1972).

Výše zmíněná poškození anatomické struktury dřeva při tepelné úpravě mají za následek zvýšení pórovitosti výsledného materiálu. Analýzou těchto vlastností se zabývá několik studií, které používají další technologie, například rentgenové paprsky, atd. (Boonsra et al. 2006b; Hietala et al. 2002; Andersson et al. 2005).



Obr. 5 Změna struktury jarních tracheid vlivem tepelné modifikace; vlevo před a vpravo po modifikaci (Boonstra a Tjeerdsma 2006)

3.1.3 Vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva

Výsledné vlastnosti tepelně upraveného dřeva závisí především na druhu dřeva a podmínkách procesu modifikace – teplotě, času, druhu inertní atmosféry atd.

Touto problematikou se zabývalo mnoho autorů a studií po celém světě, mnoho z nich bylo publikováno v původních vědeckých studiích (Rapp a Sailer 2000; Syrjanen et al. 2000; Militz a Tjeerdsma 2000; Bekhta a Niemz 2003; Tjeerdsma a Militz 2005; Kocaefe et al. 2006; Shi et al. 2007; Kocaefe et al. 2008; Guller 2012; Ahmed a Moren 2012; Cao et al. 2012; Weigl et al. 2012; Hill et al. 2012). Základy těchto studií a první výsledky byly však publikovány již dříve autory Stamm et al. 1946; Burmester 1973a a Giebler 1983. Autoři popisují změny chemického slože-

ní buněčné stěny, snížení počtu hydroxylových skupin schopných navázat molekuly vody a s tím související zvýšení rozměrové stability dřeva a odolnost vůči biologickým činitelům. Dalším důsledkem změny chemického složení je také ztmavení barvy dřeva a získání typického oděru. Jednou z hlavních nevýhod tepelně modifikovaného dřeva je snížení pevnosti dřeva v důsledku degradace buněčné stěny. Z tohoto důvodu není tepelně modifikované dřevo vhodné pro konstrukční účely a tam, kde dochází k mechanickému namáhání. Dřevo může být poškozené prasklinami a nemůže být proto přímo vystaveno kontaktu s půdou (Hill 2006). Další výzkum vlastností materiálu provedli a výsledky publikovali například Rapp (2001), Militz (2002) a Esteves a Pereira (2009).

Fyzikálně-mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva budou blíže představeny v následujících kapitolách.

3.1.3.1 Fyzikální vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva

Velmi zásadní změnou oproti nemodifikovanému materiálu je snížení rovnovážné vlhkosti dřeva (RVD), a to až o 50 %. S tím souvisí výrazné (50–90 %) zvýšení rozměrové stability. Původem těchto změn je snížení počtu hydroxylových (OH-) skupin u hemicelulóz a tím redukci sorpčních míst schopných vázat vodu (Militz 2002; Weiland a Guyonnet 2003; Pétrissans et al. 2003; Chirkova et al. 2005; Boonstra a Tjeerdsma 2006; Rautkari et al. 2013; Maejima et al. 2015; Sandberg a Kutnar 2016). Snížením počtu volných OH skupin, sorpčních míst, se také zabývá studie chemických změn během plastifikace ligninu (Hakkou et al. 2005). Problematiku související se snížením rovnovážné vlhkosti dřeva a zvýšení rozměrové stability již zmiňuje Tiemann v roce 1920.

Nedílnou součástí procesu tepelné modifikace je také změna barvy, která je rozhodující pro konečné použití materiálu. Barva se mění v závislosti na druhu dřeva, druhu procesu a především na teplotě a době jejího působení. Působením vyšší teploty a delšího času vystavení vede k tmavšímu odstínu barvy (Mitsui et al. 2001, 2003, 2004; Militz 2002; Bekhta a Niemz 2003; Brischke et al. 2007; Boonsra a Tjeerdsma 2006; Tuong a Li 2010; Miklečić et al. 2011). Vlivem chemického složení a způsobem procesu modifikace se zabýval Esteves et al. 2008. Bylo prokázáno, že změna barvy je způsobena degradací složek hemicelulózy a extraktivních látek a působením vysoké teploty (McDonald et al. 1997; Sundqvist a Moren 2002; Sehlstedt-Persson 2003; Sundqvist 2004). Pozměněná barva však není permanentní a mění se v závislosti na podmínkách okolního prostředí – podobně jako u nemodifikovaného dřeva (Syrjänen a Kangas 2000; Ayadi et al. 2003; Hill 2006; Srinivas a Pandey 2012).

Díky odbourání vazeb schopných vázat vodu byla také zvýšena odolnost vůči biologickému napadení. Bylo prokázáno, že na odolnost dřeva mají vliv i toxické složky vzniklé při termodegradaci hemicelulóz (Kamden et al. 2002). Tato odolnost roste se stupněm modifikace, tj. teplotou a časem (Rapp a Sailer 2000). Biologická odolnost byla podrobena mnoha testům za působení několika druhů degradačních činitelů a tyto výsledky byly publikovány (Viitanen et al. 1994; Viitaniemi 1997a, b; Sailer et al. 2000; Tjeerdsma et al. 2000; Kamdem et al. 2002; Jermer et al. 2003;

Gosselink et al. 2004; Hale et al. 2005; Boonstra et al. 2007; Welzbacher a Rapp 2007). Dle výsledků může tepelně modifikované dřevodosahovat první až třetí třídy odolnosti. Ochrana je ale nedostatečná v případě použití ve styku se zeminou (Westin et al. 2004).

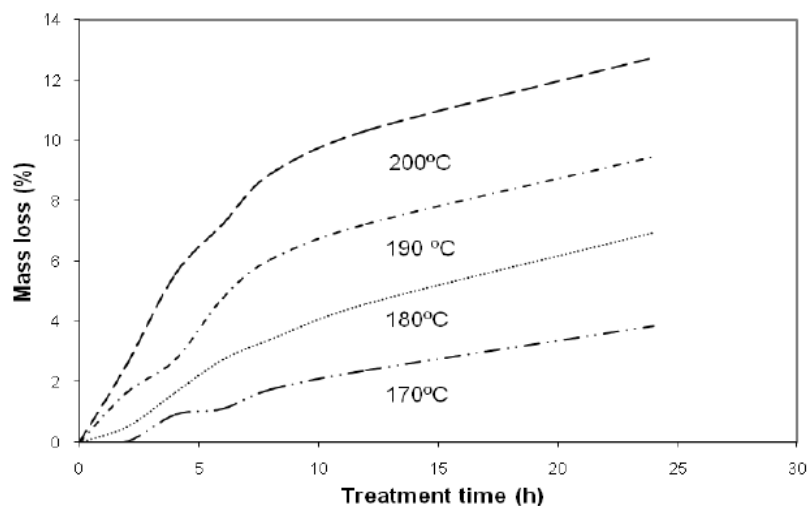
Tepelnou modifikací se ze dřeva jehličnanů odstraňuje také pryskyřice. Tím se zlepší tepelně-izolační schopnosti a to až o 10–30 % v porovnání s původním dřevem (Militz 2002; Čermák 2013).

V závislosti na úbytku polysacharidických složek se také snižuje hustota dřeva. Velikost ztráty hmotnosti se odvíjí od teploty použité při procesu modifikace a je až 15 %. Vyšší teplota znamená vyšší úbytek hmotnosti (Rapp 2001; Militz 2002; Patzelt et al. 2003; Esteves et al. 2008a; Čermák 2013).

Další změněnou atributou dřeva je také vůně, která je způsobena degradací furfuralů během procesu (Sandberg a Kutnar 2016).

3.1.3.2 Mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva

Největší nevýhodou procesu tepelné modifikace je, pokles mechanických vlastností dřeva. Z tohoto důvodu není tepelně modifikovaný materiál vhodný ke konstrukčním účelům pro nosné prvky stavebních konstrukcí. Významný je zejména vliv na ohybovou pevnost a pevnost v tahu, což je důsledkem zvýšené křehkosti tohoto materiálu. Vliv na dynamický modul pružnosti již není tak významný. Pokles mechanických vlastností je způsoben degradací polysacharidických složek dřeva během působení zvýšené teploty (Esteves a Pereira 2009).



Obr. 6 Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace v závislosti na času úpravy pro různé teploty (Esteves et al. 2008a)

Jak již bylo zmíněno, složkou, která při působení tepla degraduje nejdříve, je hemicelulóza. Ta je spolu s celulózou jednou ze složek mající ve dřevě pevnostní funkci, a proto byl její rozklad označen jako hlavní důvod snížení téměř všech mechanických vlastností tepelně modifikovaného dřeva. Největší efekt má tato

negativní změna na ohybovou pevnost (Rapp a Sailer 2000; Militz a Tjeerdsma 2000; Mayes a Oksanen 2002). Bengtsson, Jermer a Brem (2002) provedli experiment, při kterém pět hodin modifikované dřevo smrku při teplotě 220 °C dosáhlo až 50% ztráty ohybové pevnosti, ale minimální změny dynamického modulu pružnosti (MOE). Ztráta pevnosti je velmi ovlivněna podmínkami procesu tepelné úpravy (MacLean 1954; Stamm 1956). Uvedený pokles pevnosti však neplatí pro tvrdost v příčném směru. Zlepšení této vlastnosti je dáno směrem působení a pohybuje se v rozmezí 5–48 % (Boonstra 2006a, b; Popović 2008; Salca a Hiziroglu 2014).

Úbytkem polysacharidických složek dochází ke snižování hustoty dřeva. Změna hmotnosti je závislá na teplotě použité při procesu a může být až 15%. Vyšší teplota způsobí vyšší hmotnostní úbytek (Rapp 2001; Militz 2002; Patzelt, Emsehner a Stingl 2003; Čermák 2013). Hmotnostní úbytek dřeva během procesu tepelné modifikace je označován za základní parametr určující stupeň modifikace, popř. i stupeň kvality tepelně modifikovaného materiálu (Čermák et al. 2014).

3.1.4 Vliv na životní prostředí

Proces tepelné modifikace je označován jako „eco-friendly“ a během úpravy nejsou použity žádné chemické látky, které jsou toxické a nebezpečné pro životní prostředí. Proces využívá pouze vodu (výroba páry, chlazení, klimatizování) a energii (topná tělesa, ventilátory, kontrolní systém) a produkuje odpadní vodu obsahující látky vzniklé během degradace složek dřeva a plynné spaliny (Militz 2002). Při optimalizaci procesu tepelné modifikace dřeva je i na tuto oblast (tj. spotřebu energie, vody a odpadní látky) brát zřetel (Mayes a Oksanen 2002; Militz 2002; Manninen et al. 2002; Forsman 2008; Hofman et al. 2012).

Podle platných norem managementu životního prostředí (ISO 14000) se také posuzuje ekonomická stránka vlivu na životní prostředí. Nahlíží se na ní dle dvou přístupů: hodnocení životního cyklu (dopady na životní prostředí) a náklady na životní cyklus (náklady na udržení stavu životního prostředí a náklady na výrobu) (Hill 2006; Forsman 2008).

Vliv na životní prostředí se dá také posuzovat z hlediska svázané energie. Ta udává celkovou spotřebu přírodních zdrojů energie během životního cyklu výrobku. Obvykle se udává v megajoulech (MJ) na jednotku hmotnosti (kg, t) nebo objemu (m³). Dále se dělí na počáteční (spotřeba neobnovitelných zdrojů) a na opakující se (udržování procesu) svázanou energii (Hill 2006).

Principy trvale udržitelného rozvoje je nutné směřovat na snižování dopadu na životní prostředí vzhledem ke stavebním konstrukcím, prostředí, využití volby materiálu a místa a použité energie na všechny fáze existence stavby. Tyto principy by měly být spojovány a prováděny společně podle návrhu environmentální regenerace, který spojuje myšlenky udržitelného a biofilního rozvoje (biofilie – pozitivní vztah k přírodě) (Kellert 2008; Derr a Kellert 2013). Cílem je propojení lidí obývajících „zelené“ domy postavené z materiálů na bázi dřeva a jejich soucítění s přírodou (Nyrud a Bringlimark 2010).

3.1.4.1 Spotřeba energie

Komory pro tepelnou úpravu dřeva jsou vyhřívány většinou pomocí topných těles napájených elektrickou energií, která ohřívají dané médium dle použitého modifikačního procesu – voda, olej atd. Sušárny určené pro sušení dřeva jsou vyhřívány teplem vzniklým spalováním kůry, pilin a jiným dřevěným odpadem anebo topnými oleji. Nejvíce energie (až 80 %) je potřeba právě pro sušení dřeva. Celková spotřeba energie při výrobě tepelně upraveného dřeva je jen o 20 až 30 % vyšší než v případě pouhého sušení, tj. 300–600 kWh/m³ spotřebované energie během procesu tepelné modifikace (Militz 2002; Čermák 2013; Jartek 2013).

3.1.4.2 Znečištění vody

Během procesu degradují ve dřevě chemické látky, které se váží na kondenzovanou vodu. Tato voda obsahuje kyselinu octovou, furfural a jejich odvozeniny (Rétfalvi et al. 2009). Bylo odhadnuto, že při tepelné modifikaci 1 m³ smrkového dřeva vznikne asi 100–150 g/m³ kyseliny octové. Dalšími látkami znečišťujícími vodu jsou také pryskyřice a jiné komponenty dřeva, které se shromažďují ve speciální jínce a odstraňují se spolu s odpadní vodou v čističce odpadních vod (Militz 2002; Forsman 2008; Čermák 2013).

3.1.4.3 Znečištění vzduchu

Při procesu vzniká také 20–40 g/m³ jiných sloučenin, například degradací extraktivních látek. Vznikají tak znečištěné plyny, které také vyžadují speciální zacházení vzhledem k životnímu prostředí. Proto se na výfuk plynů instalují speciální lapače pevných částic a pračky vzduchu (Militz 2002; Forsman 2008; Čermák 2013).

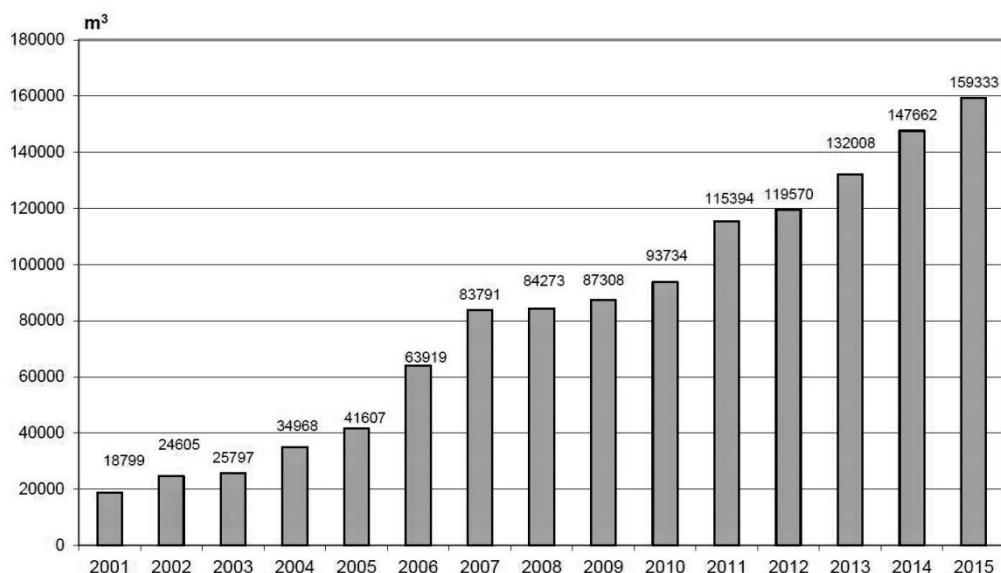
3.1.5 Vývoj trhu a použití tepelně modifikovaného dřeva na výrobky

Vzhledem k vývoji nových procesů v posledních dvaceti letech zaznamenal trh s tepelně modifikovaným dřevem velmi rychlý rozvoj a v porovnání s jinými způsoby modifikace dřeva se jedná o velmi úspěšnou metodu.

Způsobeno je to právě ekologickou nenáročností procesu a vzniklého materiálu. Nedochozí ke spotřebě ani produkci toxických látek a i přes to má podobné vlastnosti jako dřevo ošetřené chemickými látkami. Mnoho firem však ještě dává pro zvýšení odolnosti dřeva přednost chemickým látkám a zaměřují se spíše na změnu barvy, zlepšenou rozměrovou stabilitu a biologickou odolnost v porovnání s přírodním dřevem odolných dřevin.

Tyto odolné dřeviny, zejména tropické, jsou v Evropě velkými konkurenty tepelně modifikovaného dřeva, a to především ve výrobcích pro venkovní použití.

Prvním a dodnes hlavním producentem, který rozvíjí a přispívá na trh s tepelně upraveným dřevem je Finská Asociace ThermoWood. Výsledný materiál se zpracovává na pět hlavních produktů ke konečnému použití: tvrdé podlahoviny, obklady, palubky, interiérové panely, venkovní nábytek a ostatní. Výrobní závody zpracovávající tepelně modifikované dřevo vyrábí nejvíce materiál určený pro podlahoviny v komorách s objemem od 2500 do 7000 m³ (Čermák 2013).



Obr. 7 Prodeje materiálu ThermoWood od roku 2001 do 2015 (Finská Asociace ThermoWood, statistika produkce 2016)

Pro výrobu tepelně upraveného materiálu se v Evropě nejvíce používají jehličnatá dřeva. Průměrná roční produkce na tepelnou komoru je asi 25000 m³. Z tohoto materiálu se vyrábí většinou obklady, kde se s výhodou uplatňují získané vlastnosti jako například odolnost vůči povětrnostním vlivům (až 30 let), rozměrová stálost a absence pryskyřice, která z materiálu nevytéká a neznečišťuje tak okolí. Každá z firem vyrábějící materiál z tepelně upraveného dřeva má vlastní řady výrobků různých zaměření (obklady, nábytek, sauny atd.). V současnosti je již evropský trh s tepelně modifikovaným dřevem nasycen, a tak se pro tento produkt hledá i jiný trh mimo Evropu (USA, Kanada, atd.). V těchto zemích se na tepelnou úpravu používá široké spektrum dřev jehličnatých i listnatých dřevin (olše, bříza, topol, douglaska atd.) (Čermák 2013; Sandberg a Kutnar 2016).

3.2 Pěstování dřevní biomasy na plantážích

Udržitelné zásobování vzrůstajících nároků produkce dřevní biomasou vyžaduje nové možnosti řešení této problematiky. Zásoby dřeva ve stávajících porostech se rychle ztenčují a obmětní doba nejvíce pěstovaných dřevin (smrk, borovice, modřín atd.) je velmi dlouhá. Proto se dnes přistupuje k zakládání plantážových lesů, kdy ale jen zemědělsky orientované plantáže rychle rostoucích dřevin mohou poskytnout flexibilní řešení. Cílem výzkumů je posoudit možnosti využití takto pěstované dřevní biomasy nejen na energetické účely ale zejména pro různé výrobky. Speciální důraz je pak kladen na vývoj výrobků určených pro využití na stavební konstrukce (Balantinecz et al. 2001; Barba et al. 2002; De Boever 2010; Van Acker et al. 2015).



Obr. 8 Roční výmladky rychle rostoucího japonského topolu (foto autor)

Významem plantáží se detailně zabývá organizace FAO 2012 (Organizace pro výživu a zemědělství, www.fao.org) a položila také hlavní body k řešení budoucí produkce dřevní hmoty (Carle a Holmgren 2008). Majoritním zájmem je zvýšení produkce dřevní biomasy z polopřírodních lesů a plantáží, tyto nazývat plantážové lesy s umístěním ve středu kontinua přírodní les a samostatně rostoucí stromy (Jürgensen et al. 2014).

Během minulých let došlo po celém světě k velkému rozvoji plantáží pro pěstování rychle rostoucích dřevin. Pěstují se různé dřeviny a jejich hybridy na uzavřených polích a vypěstovaná dřevní hmota se sklízí během krátkého času. Sklizeň probíhá v případě malých průměrů pomocí speciálních harvestorů a nebo v případě průměrů větších řetězovými pilami. Sklizená dřevní hmota se podle svého průměru buď dezintegruje na štěpku anebo pořeže na kuláče masivního dřeva prodejné délky na další zpracování. Poté se spotřebuje jako palivo pro výro-

bu energie – přímo tepla nebo dodatečně elektřiny. Jedná se tak o velmi perspektivní a levnou biomasu a obnovitelný zdroj energie (Horníček et al. 2015). Dalším způsobem zpracování je použití štěpky na výrobu materiálů na bázi dřeva jako jsou například deskové materiály MDF, OSB nebo WPC (Balatinecz et al. 2014; Van Acker et al. 2015).

Dřevinami pěstovanými na plantážích jsou především různé druhy a hybridy vrb (*Salix*), topolů (*Populus*), osik (*Populus tremula*), akátu (*Robinia*), exotických paulovnií (*Paulownia*), akácií (*Acacia*) a také eukalyptu (*Eucalyptus*).

3.2.1 Plantážově pěstované dřeviny a bioenergie

V budoucnosti bude nedostatek zdrojů energie a také se bude přihlížet ke změně klimatu vlivem spalování fosilních paliv. Za těchto okolností musí být dosaženo rovnováhy mezi ekonomikou, ekologií a sociálním zájmem, což jsou základy udržitelnosti, která byla předložena na konci 20. století a od počátku je neoddělitelně spojena s lesnictvím (Sandberg a Kutnar 2016).

Energie z biomasy je při porovnání s fosilními palivy velmi důležitá v rámci udržitelnosti a dopadu na životní prostředí. Energetické dřevo je důležité v zemích třetího světa, například v Africe. V těsné závislosti na rozvoji biotechnologií na začátku 21. století je i vývoj hybridních topolů a vrb, jejich kultivace, sklizeň a konečné zpracování. Při zaměření na určité vlastnosti materiálu však dochází ke ztrátě jiných. Můžeme vypěstovat dřevo s vyšším podílem ligninu kvůli vyšší výhřevnosti materiálu, který bude produkovat více energie, ale takovýto materiál nebude vhodný pro výrobu celulózy a papíru a také nebude mít dobré mechanické vlastnosti pro konstrukční použití. Význam celulózy ve dřevě je důležitý a proto je nutné se rozhodnout jaké konečné vlastnosti má materiál mít a jak tyto vlastnosti s ohledem na nejlepší výsledky zkombinovat (Riemenshneider et al. 1996a, b; Beaudoin et al. 1992; Koubaa et al. 1998b; Ligerio et al. 2008; Gonzáles-García et al. 2010; Van Acker et al. 2015).

3.2.2 Plantážově pěstované dřeviny a stavební konstrukce

Dřevo topolu je klasifikováno v tabulkách tříd pevnosti jako C18 a C24 (ČSN EN 338) a tak může být použito jako levná alternativa stavebního materiálu ze dřeva jehličnatých dřevin pro méně únosné konstrukce. Kritickými parametry pro pevnost je počet a rozměry suků. Stejně zásady a požadavky kvality jako pro dřevo používaných dřevin platí i pro zpracování topolu. Selektce, pěstování a způsoby cílené produkce se zaměřením na pevnost a mechanické vlastnosti místo na maximální růst a výnosy znamená zvyšující se kvalitu dřeva (Van Acker et al. 2015).

Zelené bydlení užívá více a více dřeva a to hlavně díky nízké energetické náročnosti. Dřevo a materiály na bázi dřeva jsou velmi vhodné pro výstavbu nízkonákladových staveb. Mimoto svázaná energie (energie spotřebovaná na produkci – počáteční) a také energie vložená (energie spotřebovaná na udržování – udržovací) jsou důležité pro výrobky a stavby na bázi dřeva. Pro dřevěné konstrukce je dnes nabízena široká škála nových konstrukčních prvků a to i z topolového

dřeva a vize několikapodlažních budov ze dřeva bude tedy možná a uskutečnitelná (Hill 2006; Van Acker et al. 2015).

Mimo tradičních výrobků na bázi dřeva, jako je například překližka, jsou zde další možnosti. Jednou z nich je například CLT (křížem lepené řezivo) panel. Dalšími možnostmi pro využití plantážově pěstovaného dřeva je konstrukční materiál Glulam (lepené lamelové řezivo), dnes založené na výrobcích jako je například MSR (strojově lisované řezivo). Deskové materiály jako OSB (deska s orientovanými třískami) vyráběné z osiky nebo topolu jsou v Severní Americe považovány za běžné výrobky. Řezivo z laminovaných třísek (LSL) se v Kanadě podobá OSB a na výrobu se používají třísky z rychle rostoucích osik a topolů. Dále se ze dřeva plantážově pěstovaných dřevin vyrábějí materiály OSL (řezivo z orientovaných třísek), překližka a LVL (řezivo z laminovaných dýh) (Youngquist a Spelter 1990; McKeever a Spelter 1998; Balatinecz et al. 2014; Van Acker et al. 2015).

3.2.3 Vlastnosti dřeva plantážově pěstovaných dřevin

Kvalitu dřeva plantážově pěstovaných dřevin již zkoumalo mnoho výzkumníků a výzkumných týmů po celém světě. Jednalo se zejména o topoly a vrby (Matyas a Peszlen 1997; Koubaa et al. 1998b; Fujiwara a Yang 2000; Jourez et al. 2001; DeBell et al. 2002; Monteoliva et al. 2005; Fang et al. 2006; De Boever et al. 2007; a další).

Dřevo plantážově pěstovaných dřevin obsahuje kvůli rychlému růstu a krátké obmýtní době převážně juvenilní nevyzrálé dřevo, které je horší a méně rozměrově stabilní než dřevo vyzrálé (Li 2002; Balatinecz et al. 2014). Kvalita tohoto dřeva je také ovlivněna velkým množstvím vad způsobených rychlým růstem. Těmito vadami jsou suky, vnitřní pnutí a točitost a mají zásadní vliv na možnosti dalšího zpracování (Balatinecz et al. 2014). Nízká pevnost, tvrdost a odolnost, nezajímavá barva a textura jsou zřejmými nevýhodami pro použití v oblasti nábytkářského průmyslu (Abraham et al. 2010).

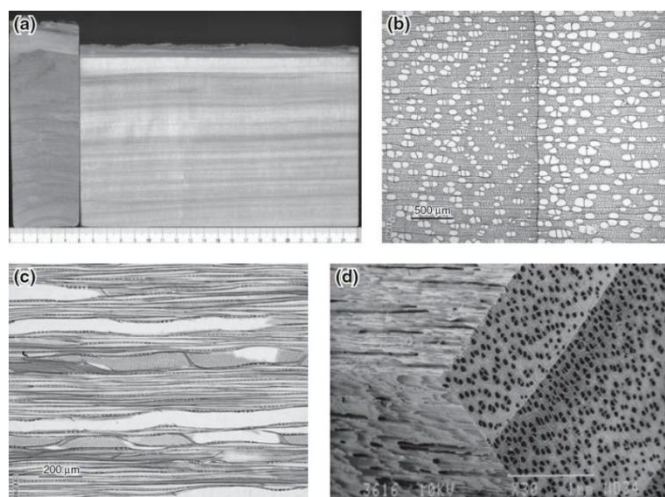
Především hustota, pevnost a tvrdost tohoto materiálu nabízí možnost pro případnou modifikaci (Panshin a De Zeeuw 1980; Balatinecz et al. 2014). Tyto vlastnosti je možné modifikovat pomocí lisování anebo jeho kombinací s tepelnou úpravou. Vhodným procesem pro tuto modifikaci je proces VTC (tzn. „viscoelastic thermal compression“), který kombinuje plastifikaci přehřátou parou, mechanické slisování a tepelnou úpravu. Tímto způsobem je možné dosáhnout více jak trojnásobné zvýšení hustoty (Kamke a Sizemore 2008; Kutnar et al. 2008a; Horníček et al. 2015).

3.2.3.1 Fyzikální vlastnosti dřeva plantážově pěstovaných dřevin

Anatomická stavba a základní charakteristické znaky plantážově pěstovaných dřevin jsou pro všechny druhy stejné, liší se ale v textuře, hustotě, pevnosti a také v barvě. Odlišnosti mohou vzniknout také kvůli rychlosti růstu a způsobu péče o rostliny. Rychle rostoucí dřeviny vykazují velkou variabilitu ve vlastnostech.

Například osiky mají esteticky lepší texturu dřeva než topoly kvůli širším pórům. Dřevo rychle rostoucích hybridů topolů má často nižší hustotu a hrubší strukturu než dřevo ze stromů vyrostlých v přírodních lesech.

Chemické složení topolů a vrb se vyznačuje vysokým podílem polysacharidických složek a nízkým podílem ligninu (80 a 20 %). Například dřevo osiky obsahuje 53 % celulózy, 31 % hemicelulózy, 16 % ligninu a asi 2 % extraktivních látek (Mullins a McKnight 1981). Pro vrbu je to 79% podíl polysacharidů a 21 % ligninu (Deka et al. 1992).



Obr. 9 Fotografie makro (a) a mikrostruktury (b-d) dřeva topolu (*Populus maximowiczii*). Podélný a příčný řez zobrazuje obrázek makrostruktury (a). Mikrostruktura je zobrazena na příčném (b) a podélném (c) řezu. Obrázek (d) ukazuje 3D sken elektronovým mikroskopem (Balatinecz et al. 2014)

Barva bělového dřeva topolu je většinou bílá až nažloutlá a splývá s dřevem jádrovým, které má naředlou až hnědou barvu. Letokruhy jsou viditelné pouhým okem ale ne vždy, široké jsou 1 až 3 cm (Balatinecz et al. 2014). Hustota dřeva topolů při vlhkosti 0 % se pohybuje v rozmezí 300 až 370 kg/m³, u vrb je to asi 360 kg/m³ (Kutnar et al. 2009; Balatinecz et al. 2014; Horníček et al. 2015). V prostředí s relativní vlhkostí vzduchu od 60 do 90 % (venkovní prostředí) je rovnovážná vlhkost dřeva 12–15%, v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu od 30 do 60 % je pak rovnovážná vlhkost dřeva 6 až 10% (De Boever et al. 2007). Hodnoty objemového sesychání jsou podobné jako pro dřevo různých dřevin a pohybují se kolem 12% (Koubaa et al. 1998). Dřevo topolu, osiky a vrb je málo trvanlivé a odolné. Tyto vlastnosti ale můžeme výrazně zlepšit použitím různých způsobů a technologií. V případě materiálů z dezintegrovaného dřevního materiálu se ochranné látky směřují do pojiva a jeho aditiv, v případě masivního dřeva se dnes zkoumají možnosti použití různých druhů a způsobů modifikací jeho vlastností (Van Acker et al. 2015). Dobrým způsobem může být například chemická modifikace. Velmi velký potenciál se skrývá v použití způsobu tepelné modifikace.

3.2.3.2 Mechanické vlastnosti dřeva plantážově pěstovaných dřevin

Mechanické vlastnosti dřeva rychle rostoucích dřevin jsou v porovnání s nejpoužívanějšími dřevinami (ohybová pevnost při vlhkosti dřeva 12 % pro smrk 80 MPa a buk 109 MPa; Ugolev 1982, 1986) poměrně nízké. Poměr mezi pevností dřeva k jeho hustotě je podobný jako u komerčních bělových dřev (De Boever et al. 2007). Průměrná ohybová pevnost u dřeva topolu je 58 až 63 MPa což je o 14 % méně než u borovice a smrku, modul pružnosti je 8,8–9,9 GPa. Pro dřevo hybridních topolů z Belgie je ohybová pevnost 55,7 MPa a modul pružnosti od 5,3 do 6,25 GPa (Balatinecz et al. 2014). De Boever et al. (2007) uvádí ohybovou pevnost 62–74 MPa a modul pružnosti 6,5–7,8 GPa. Dle Williamse (1998) je ohybová pevnost pro dřevo hybridních topolů z Kanady 57,2 MPa a modul pružnosti 7,55 GPa. De Boever et al. 2007 prokázali korelaci mezi pevností a hustotou u dřeva hybridů topolů.

3.2.4 Modifikace vlastností dřeva plantážově pěstovaných dřevin

V současné době je na trhu velké množství komerčních procesů modifikaci vlastností dřeva, které jsou založeny na rozdílných principech a technologiích. Základním kamenem procesů modifikací vlastností dřeva je působení na hydroxylové skupiny v něm obsažené a to blokováním, odbouráním, roubováním a síťováním. Procesy se dále dělí dle modifikačního činitele na tepelné, chemické a mechanické. Vybranými procesy modifikace dřeva je možné cílit na specifické vlastnosti a ty přechodně nebo trvale změnit (Homan et al. 2000; Hill 2006, 2011).

Materiálové vlastnosti dřeva plantážově pěstovaných dřevin, které nejsou vhodné pro širší využití, je vhodné modifikovat a docílit tak jejich výrazného zlepšení. V nedávné době došlo k několika experimentům založených na úpravě vlastností dřeva plantážově pěstovaných dřevin, mezi kterými je nejvíce zastoupeno dřevo topolu a jeho hybridů. Z pohledu mnoha známých modifikačních procesů a plantážově pěstovaných dřevin proto můžeme toto téma považovat za minimálně studované, skýtající velký prostor a možnosti pro další výzkum.

3.2.4.1 Tepelná modifikace dřeva plantážově pěstovaných dřevin

Posouzení nejvhodnějšího nastavení procesu pro tepelnou modifikaci dřeva plantážově pěstovaného topolu vzhledem k výsledným vlastnostem materiálu provedli Wang et al. (2015). Inertní atmosférou bylo prostředí nasycené přehřátou vodní párou a jako nejvhodnější kombinace teploty a času, vzhledem k výsledným vlastnostem, uvádějí 180 °C a 3,5 hod.

Analýze barevných změn, hmotnostním úbytkům a rozměrovým změnám u tepelně upraveného dřeva hybridu akácie při teplotě od 210–230 °C po dobu 2 až 6 hodin se věnovali Tuong a Li (2010). Provedli také FT-IR analýzu chemického složení modifikovaného materiálu. Inertní atmosférou byl v tomto experimentu dusík. Hmotnostní úbytek byl pro teplotu 230 °C a časy 2 a 4 hod téměř stejný, a to

8,1 ±0,5 %. Podobných hodnot pak bylo dosaženo úpravou při teplotě 215 °C a času 6 hodin.

Gao et al. (2016) tepelně upravili dřevo hybridu topolu ve vakuu při teplotách 140 až 200 °C po dobu 1–3 hod. Zkoumali změnu barvy, hustotu, sesychání, modul pružnosti (MOE) a pevnost v ohybu a tlaku a biologickou odolnost. Objemové sesychání bylo pro 200 °C a 3 hodiny 8,79 % oproti 13,21 % u referenčního materiálu. Ohybová pevnost při stejných podmínkách úpravy pak byla 41–68 MPa oproti 70,94 MPa referenčního materiálu.

Tepelnou úpravu dřeva hybridu topolu v horkém oleji provedli Bak a Nemeth (2012). Oleje byli přírodního charakteru ze semen slunečnice, řepky a lnu. Účinnost omezení bobtnání (ASE) při teplotě 200 °C a po dobu 6 hodin bylo 39 % v radiálním směru a 46% ve směru tangenciálním. Razak et al. (2011) uskutečnili podobný experiment, kdy použili palmový olej a dřevo akácie. Měřili změnu barvy a chemického složení.

3.2.4.2 Mechanická modifikace dřeva plantážově pěstovaných dřevin

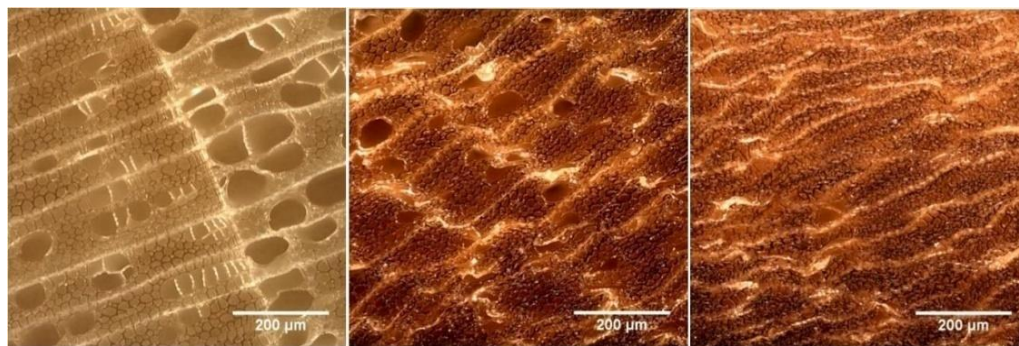
Zvýšení pevnosti a tvrdosti můžeme docílit mechanickou modifikací – slisováním. Tento materiál však po vlhkostním zatížení opět nabývá původní rozměr před stlačením (Kamke 2006). Minimalizováním nebo odstraněním tohoto jevu se již zabývalo mnoho autorů (Kawai et al. 1992; Inoue et al. 1993a; Navi a Girardet 2000; Higashihara et al. 2001; Navi a Heger 2004; Inoue et al. 2008; Satoshi et al. 2008). Fixace slisovaných rozměrů lze provést impregnací dřeva pryskyřicemi (Stamm a Baechler 1960; Inoue et al. 1993b; Yano 2001; Shamset al. 2004; Shams et al. 2006; Chris a Frederick 2008) anebo tepelnou úpravou (Dwianto et al. 1997; Welzbacher et al. 2005). Právě tepelná úprava se ukázala jako vhodná metoda; probíhá pomocí vyhřívaných desek lisu přímo při lisování. Tuto problematiku už zkoumalo množství autorů (Wang et al. 2000; Wang a Cooper 2004; Wang a Cooper 2005; Unsal a Candan 2007; Unsal a Candan 2008; Unsal et al. 2009; Reiniati 2009; Candan et al. 2010; Dogu et al. 2010; Abraham et al. 2010; Unsal et al. 2011a, b, c; Candan et al. 2013).

Abraham a Nemeth (2012) sledovali fyzikální a mechanické vlastnosti tepelně upraveného mechanicky denzifikovaného dřeva klonu topolu. Použili několik teplot, časů a poměrů lisování. Průměrná pevnost v ohybu referenčního materiálu byla 79,85 MPa a hodnoty modifikovaného materiálu od 87 až 116 MPa. Podobným způsobem upravili dřevo paulovnie Candan et al. (2013). Největší bobtnání v tloušťce vykazoval nejvíce upravený materiál (170 °C; 45 min; 2,25 MPa), a to 3,4 %. V případě modifikovaného hybridu topolu (170 °C; 45 min; 2 MPa), bylo naměřeno bobtnání v tloušťce 5,6 % (Candan et al. 2013).

Speciálním procesem využívající uvedený výše zmíněný způsob úpravy je VTC proces („Viscoelastic Thermal Compression“). Jedná se o kombinaci plastifikace přehřátou parou, mechanického slisování a tepelné úpravy lisovacími deskami (Kamke a Sizemore 2008). Používá se zejména pro výrobu tenkých plošných materiálů vysoké hustoty a tvrdosti. Při tomto procesu se využívá viskoelastických

vlastností dřeva, kdy po aplikaci přehřáté vodní páry dojde k výraznému změkčení struktury dřeva a to umožní velmi velké poměry slisování (až 500 %) bez jejího porušení (Lenth 1999; Lenth a Kamke 2001; Wolcott a Shutler 2003; Kamke 2006).

Kutnar et al. (2008a, b; 2009) provedli několik experimentů zkoumající vlastnosti dřeva hybridu topolu upraveného VTC procesem. Při denzifikaci materiálu tloušťky 6 mm na tloušťku 2,5 mm a teplotě 200 °C dosáhli 132% stupně zhuštění struktury bez jejího porušení. Z tohoto materiálu v kombinaci s referenčním dřevem pak vyrobili třívrstvý kompozit (132-0-132; tloušťka 6 mm), na kterém testovali mechanické vlastnosti. Pevnost v ohybu byla 154 MPa oproti 76 MPa referenčního materiálu a modul pružnosti 19,9 GPa oproti 8,7 GPa. Další výzkum vlastností dřeva hybridu topolu upraveného VTC procesem provedl Horníček et al. (2015). Materiál slisovaný z 6mm na 2 mm při 200 °C dosáhl stupně zhuštění hodnoty 309,2 % bez porušení struktury (Obr. 10).



Obr. 10 Fotografie mikroskopické struktury dřeva referenčního vzorku hybridu topolu (vlevo), modifikovaných vzorků procesem VTC (zhuštěno ze 4 mm na 2 mm; ve středu a ze 6 mm na 2 mm; vpravo) (Horníček et al. 2015)

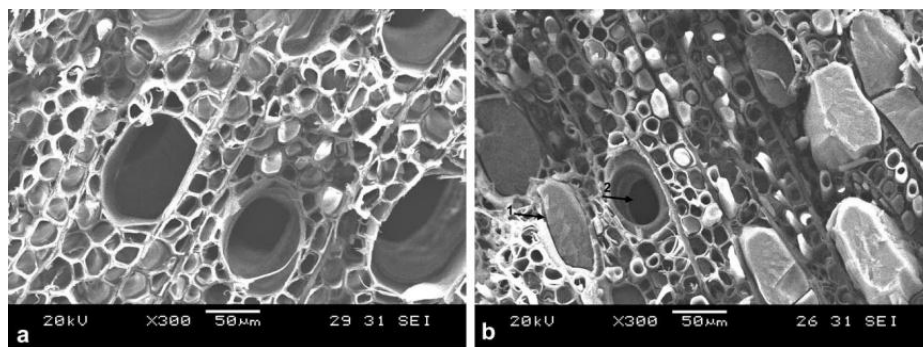
3.2.4.3 Chemická modifikace dřeva plantážově pěstovaných dřevin

Při této modifikaci se do dřeva vpravují chemické látky, které mohou, ale nemusí, reagovat s chemickými složkami ve dřevě. Hill (2006) uvádí, že chemickou modifikací je pouze děj, při kterém vznikají chemické reakce mezi impregnační látkou a složkami dřeva. Jedná se pak o tzv. aktivní modifikaci, která spočívá v blokování nebo nahrazení hydroxylové skupiny v buněčné stěně molekulou jinou. Sníží se tak rovnovážná vlhkost a hygroskopicitá výsledného modifikovaného materiálu. Základní vlastností modifikací je tedy snížení sorpčních vlastností upraveného materiálu.

Impregnace pak spadá do pasivní modifikace a to z důvodu působení chemické látky v lumenech buněk. Nepochází však k jejímu navázání na chemickou strukturu dřeva. Tyto impregnační látky jsou většinou hydrofobního charakteru a výsledný modifikovaný materiál tedy odpuzuje vodu a má tak snížené sorpční vlastnosti (Hill 2006).

Vlastnostmi chemicky modifikovaného dřeva plantážově pěstovaného topolu se již zabývalo několik výzkumných týmů (Yildiz et al. 2005; Ding et al. 2008, 2012; Gao et al. 2009a, b; Koubaa et al. 2012; Li et al. 2011a, b, 2012a, b, 2013). Také byl zkoumán vliv různých polymerických monomerů, pryskyřic, polyuretanových pryskyřic, anhydridu kyseliny maleinové anebo styrenu (Yildiz et al. 2005; Gao et al. 2009a,b; Ding et al. 2012; Koubaa et al. 2012; Li et al. 2011a, 2012b, 2013; Li et al. 2012a, b, 2013; Li et al. 2011b, 2012b)

Rademacher et al. (2015) provedli experiment, kdy sledovali vlastnosti dřeva akátu impregnovaného extraktem z jádrového dřeva akátu. Impregnační látka se skládala z extraktu rozemletého jádrového dřeva akátu smíšeného s vodou a metanolem v poměru 1:1. Dále zkoumali vlastnosti dřeva klonu topolu impregnovaného odpadní vodou z procesu tepelné modifikace při 180 a 200 °C. Oproti referenčním vzorkům dřeva dosáhli modifikované vzorky lepších hodnot rozměrové stability a také snížené rovnovážné vlhkosti dřeva. Dřevo vrby ipregnované 3% roztokem CCA (chrom, měď, arsen) studovali De Boever et al. (2008). Zjistili zlepšení biologické odolnosti u modifikovaného materiálu na třetí třídu venkovní expozice. Vliv mikrovlnného záření na proces acetylce dřeva plantážově pěstovaného topolu zkoumali Dömény et al. (2015). Uvádí nejvhodnější nastavenímikrovlnného záření a to 2 kW s posunem dopravníku 0,1 m/min. Wu et al. (2010) impregnovali dřevo hybridu topolu močovino-formaldehydovou pryskyřicí a poté jej denzifikovali s kompresním poměrem 28,6 %. Hustota materiálu při nulové vlhkosti vzrostla ze 410 na 700 kg/m³. Zvýšila se také pevnost v ohybu, a to z 82,2 na 131,4 MPa. Dřevo plantážově pěstovaného topolu impregnovali Ding et al. (2013) metyl methakrylátem (MMA) polymerizovaným teplem. Výsledkem bylo zpevnění struktury dřeva. Pevnost v ohybu se zvýšila ze 46,5 na 55,2 MPa.



Obr. 11 Forografie mikroskopické struktury dřeva hybridu topolu nemodifikovaného (a) a dřeva modifikovaného impregnační látkou PMMA. Šipky indikují nespojení PMMA se dřevem (1) a nevyplněné cévy (2) (Koubaa et al. 2012)

3.3 Plantážově pěstovaný topol

Plantáže topolů jsou důležité a budou mít v budoucnosti zásadní roli v produkci dřevní biomasy. Už dnes začínají být jejím hlavním zdrojem a země jako je Indie a Čína do nich nedávno značně investovaly (FAO 2012). V Evropě byl tradiční pěstební způsob plantáží topolu doplněn o rychle rostoucí mlaziny (SRC – „short rotation coppice“), který rozšířil možnosti využití dřevní biomasy pro produkci bioenergie (Van Acker et al. 2015). Mantau et al. (2010) a další studie předpokládají, že kolem roku 2030 by mohly plantážově pěstované topoly a podobné dřeviny, jako například vrby nebo osiky, produkovat dřevo vhodné pro velmi široký rozsah aplikací.

Výzkum topolu a vrby je podporován mezinárodní organizací FAO prostřednictvím organizace IPC (Mezinárodní topolářská komise) a ve spolupráci s IUFRO (Mezinárodní unie lesnických výzkumných organizací).

Nejvíce se na plantážích pěstují různé hybridy topolů, například *Populus nigra*, *Populus maximovitzii*, *Populus deltoides*, *Populus trichocarpa* a další. Hybridy těchto topolů se používají hlavně kvůli jejich rychlému růstu a nenáročnému charakteru, odolnosti vůči škůdcům a rychlosti regenerace. Tyto hybridy se hromadně nazývají Japonské topoly díky původu prvního z nich (Weger a kol. 2015; Horníček et al. 2015).

3.3.1 Plantážově pěstovaný topol v České republice

Velmi oblíbeným klonem pěstovaným v České republice je klon MAX-4 (J-105); *Populus nigra* × *Populus maximovitzii*). Rozmnožování se provádí hlavně řízkováním z matečnicových porostů a efektivní reprodukce a obmětní doba nastává už po 2–6 letech růstu. Roční přírůst závisí na klimatických a půdních podmínkách a výška růstu je kolem 2,5–4,5 m (tj. 10 až 20 tun biomasy na 1 ha). Odolává také až dvouměsíčnímu suchu a krátkodobému zaplavení. Nejvhodnější nadmořskou výškou pro pěstování je 650 m n. m. Po každé sklizni vyraší z pařezu nové odnože a tím začíná kontinuita růstu udržitelná po 20 až 25 let. Konečným krokem po této době je odstranění starých pařezů vyoráním, nebo chemicky a obnovení plantáže novými řízků (Weger a kol. 2015).

Sklizeň probíhá v době vegetačního klidu v zimě, po 2 letech sekačkou na štěpku anebo po pěti letech na palivové dříví. Dřevo se využívá v mnoha odvětvích, například ve stavebnictví, papírenství nebo výrobě drobných dřevěných výrobků (hračky atd.). Hlavním důvodem pěstování je však ekonomicky velmi výhodné palivo v podobě kuláčů, štěpky nebo peletek a briket. Výhřevnost tohoto dřeva může být srovnána s výhřevností hnědého uhlí a pohybuje se kolem 14,5 MJ na 1 kg dřeva při 20% vlhkosti. Za pět let je z 1 ha plantáže možno vytěžit až 300 prn dřeva. Tato dřevina se také s výhodou používá jako větrolam a protihluková clona (Vypěstuj si les 2015; Weger a kol. 2015).

4 Materiál a metodika

Cíle práce budou naplněny experimentálním měřením fyzikálně-mechanických vlastností dřeva a prostudováním dostupných zdrojů z oblasti odborné literatury a to hlavně vědeckých publikací, odborných článků a učebních textů týkajících se probírané problematiky tepelné modifikace dřeva a plantážově pěstované dřevní suroviny.

4.1 Materiál

Materiálem použitým pro výzkum je dřevo plantážově pěstovaného topolu. Jedná se o křížence topolů *Populus nigra* a *Populus maximowitzii* a jeho označení je MAX-4 (J-105). Věk stromů byl 6 let a nazačátku Listopadu roku 2014 došlo k odběru dvanácti kusů, včetně větví a nutričních vzorků ze tří kusů a vzorků listí a zeminy pro další analýzy.

Materiál pochází z plantáže nedaleko města Holice v České republice. Hustota sadby v době odběru vzorků byla 10 tis. rostlin na hektar. Toto místo v teplém, středně vlhkém podnebí se dá klasifikovat jako velmi suché s obsahem vlhkosti 4–7, položené ve 245 m n. m., střední svahovitosti (7–12 °) se severní expozicí a průměrnou roční teplotou mezi 7 a 9 °C. Zemina je kyselější z důvodu blízkosti lesa. Patří mezi lehké, neschopné vázat vodu s nízkou kamenitostí rozsahu 10–25 % (eKatalog BPEJ 2016).



Obr. 12 Situace na místě odběru po rozřezání soustředěných vyselktovaných stromů (foto autor)

4.2 Výroba zkušebních vzorků

Stromy byly selektovány dle odborného posudku vzhledem k vadám (suky, křivost, točitost) na ploše plantáže a poté pokáceny motorovou řetězovou pilou a nakráčeny na výřezy o délce 1,5 metru. Před krácením ještě proběhlo měření délek a průměrů stromů. Po převozu materiálu byly výřezy odkorněny a podélně rozříznuty kotoučovou pilou v místě dřeně. Takto připravené vzorky byly umístěny do skladovací místnosti se stálými podmínkami ($T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{RVV} = 65\text{ \%}$) k pozvolnému vysychání.



Obr. 13 Odkorněná polovina výřezu po vysušení s označenými budoucími segmenty (foto autor)

Z vyschlých výřezů byly vybrány kusy s kvalitním dřevem a nejmenším počtem růstových vad. Celkem bylo vybráno 17 nejlepších výřezů a to tak, aby byl výběr, vzhledem k charakteru materiálu, co nejvíce variabilní. Přehledné schéma výroby vzorků je uvedeno na obrázku Obr. 16. Poté byl materiál délkově nakráčen dle požadavků experimentálních měření s nadměrkem a maximální snahou na vymanipulování vad. Každý výřez byl tedy rozřezán na 5 dílů. Vzniklé segmenty byly dále rozpůleny a jednotlivé kusy značeny podle původní polohy ve výřezu kvůli budoucímu rozřazení do skupin vzorků. Důvodem pro toto rozřazení byla opět snaha o co největší variabilitu vlastností dřeva budoucího vzorku materiálu bez závislosti na poloze ve výřezu a prvotní podobnosti výřezů.

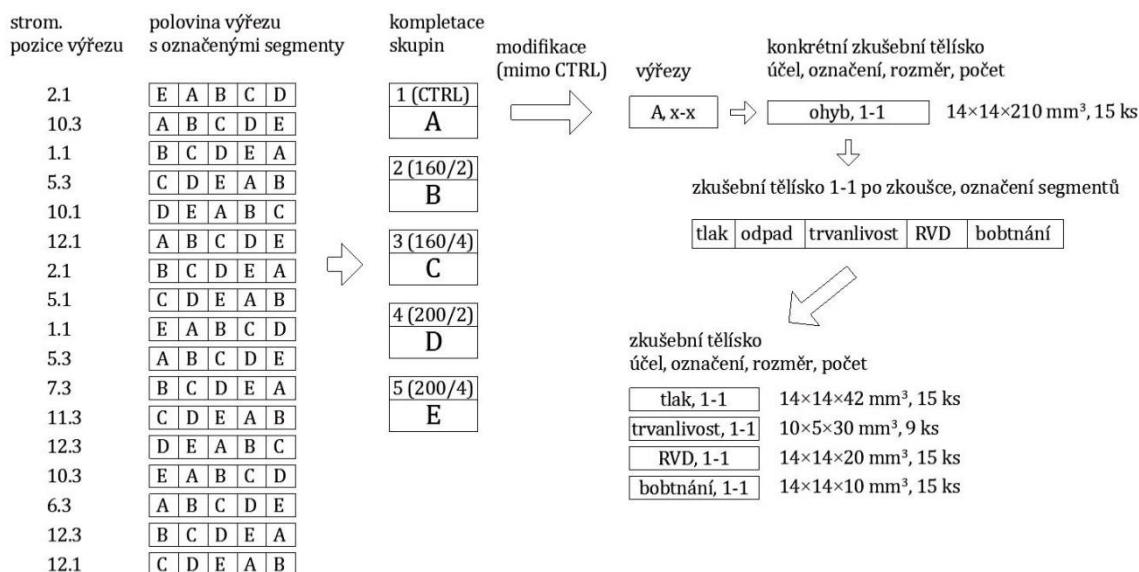


Obr. 14 Vyřezané segmenty z poloviny výřezu (foto autor)



Obr. 15 Hrubé výřezy vymanipulované ze segmentů (foto autor)

Skupiny vzorků hrubých přířezů byly označeny čísla podle stupně modifikace. Bylo rozhodnuto, že modifikovány budou hrubé přířezy a ne následně vyrobené zkušební vzorky. Při tepelné modifikaci by mohlo u zkušebních vzorků dojít k jejich poškození vlivem změn ve struktuře dřeva při působení vysoké teploty. Zkušební tělíška pro experimentální měření byly tedy vyrobeny až z modifikovaného materiálu.



Obr. 16 Schematicky znázorněný postup výroby vzorků od stromu až po exemplární případ konkrétního zkušebního tělíska

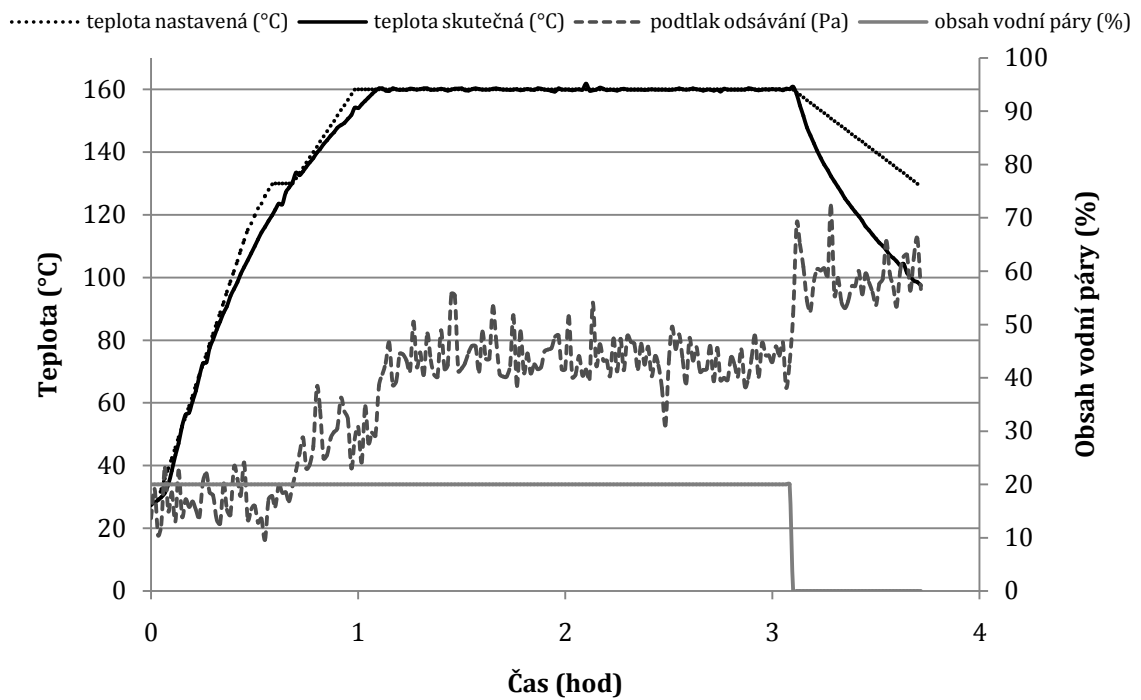
4.2.1 Tepelná modifikace

Kvůli možnostem tepelné modifikace dřeva, které jsou velmi variabilní, bylo nutné stanovit takové modifikační postupy, aby výsledné vlastnosti materiálu vhodně reprezentovali technologické možnosti dnešních procesů tepelné modifikace. Rozhodujícími faktory jsou teplota a doba, po kterou působí zvýšená teplota.

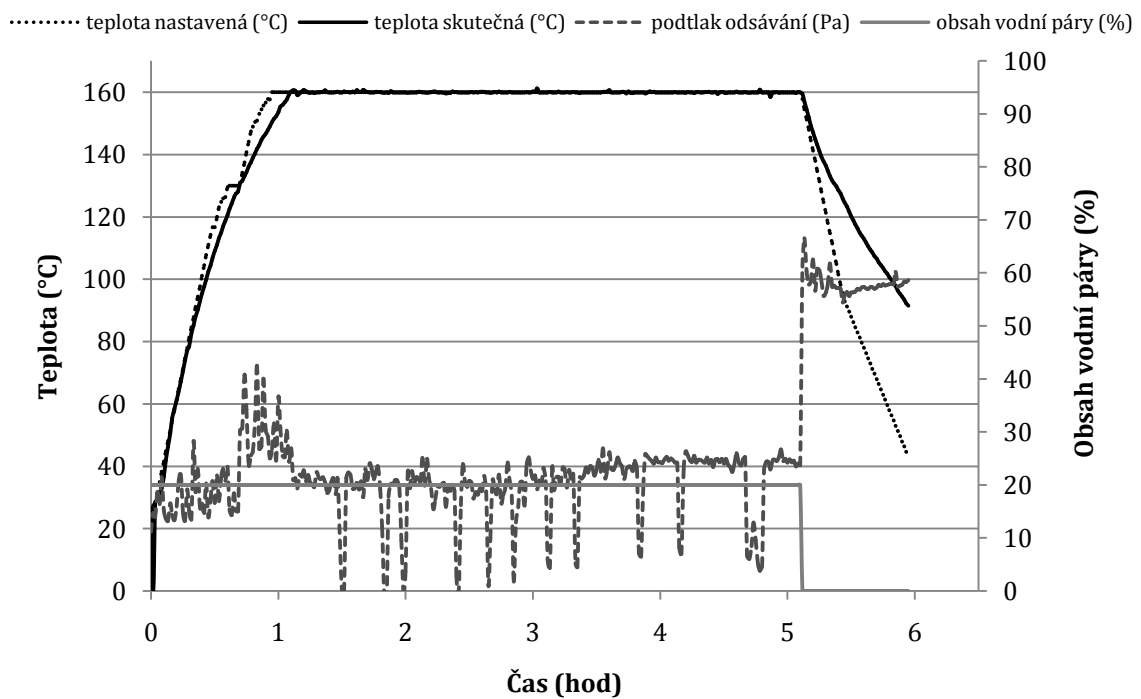
4.2.1.1 Modifikační režimy

Proces tepelné úpravy byl proveden pomocí poloprovodní laboratorní komory pro tepelnou úpravu dřeva (Katres spol. s r.o.) v prostředí vodní páry. Byla testována tepelná úprava s režimy 160 a 200 °C a po dobu 2 a 4 hodiny. Rozsah teplot a časů byl zvolen z důvodu zaručení zásadní rozdílnosti ve vlastnostech výsledných materiálů a možnosti odvození možných vlastností materiálů modifikovaných teplotami v daném rozmezí. Průběh procesu je znázorněn na Obr. 17 až Obr. 21.

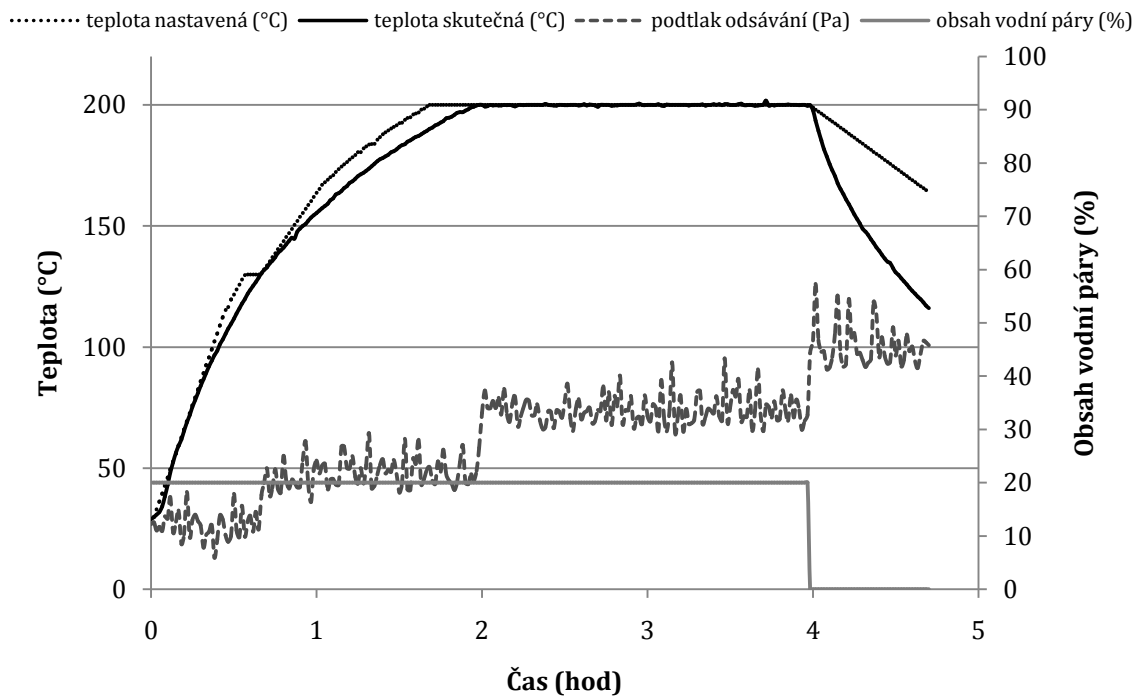
Konečnými režimy pro tepelnou modifikaci hrubých přířezů dřeva byly tedy čtyři kombinace výše uvedených teplot a časů, a to 160 °C a 2 hodiny (Obr. 17), 160 °C a 4 hodiny (Obr. 18), 200 °C a 2 hodiny (Obr. 19) a poslední 200 °C a 4 hodiny (Obr. 20).



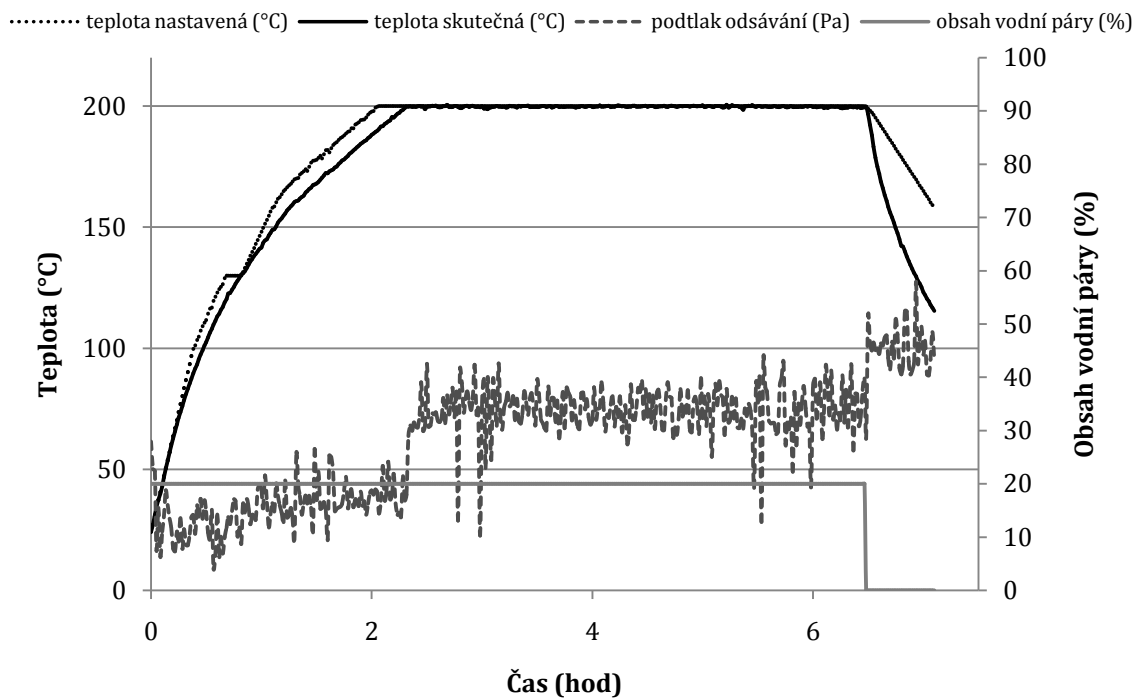
Obr. 17 Režim tepelné modifikace skupiny 2 – teplota 160 °C, čas 2 hodiny



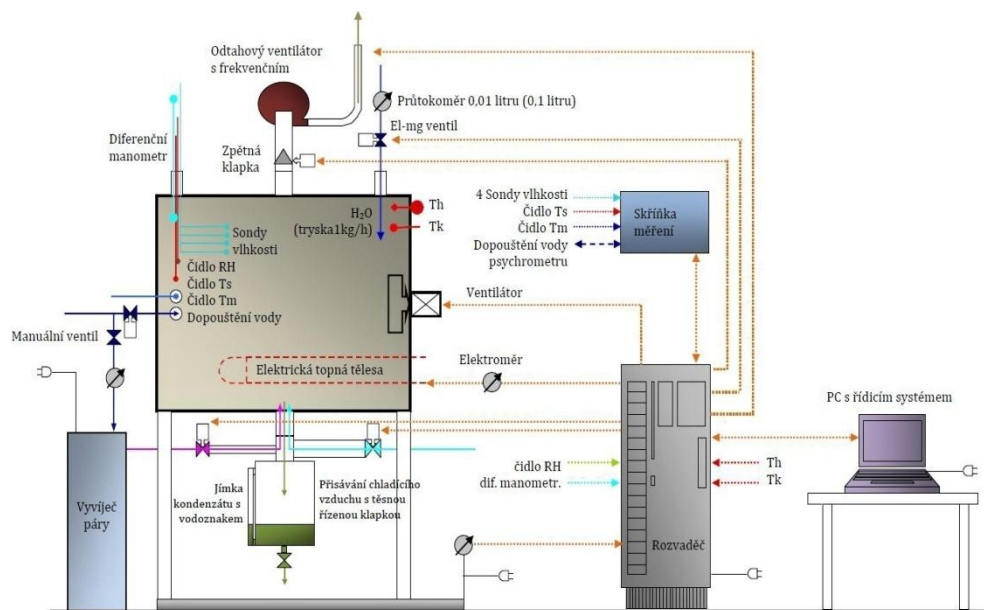
Obr. 18 Režim tepelné modifikace skupiny 3 – teplota 160 °C, čas 4 hodiny



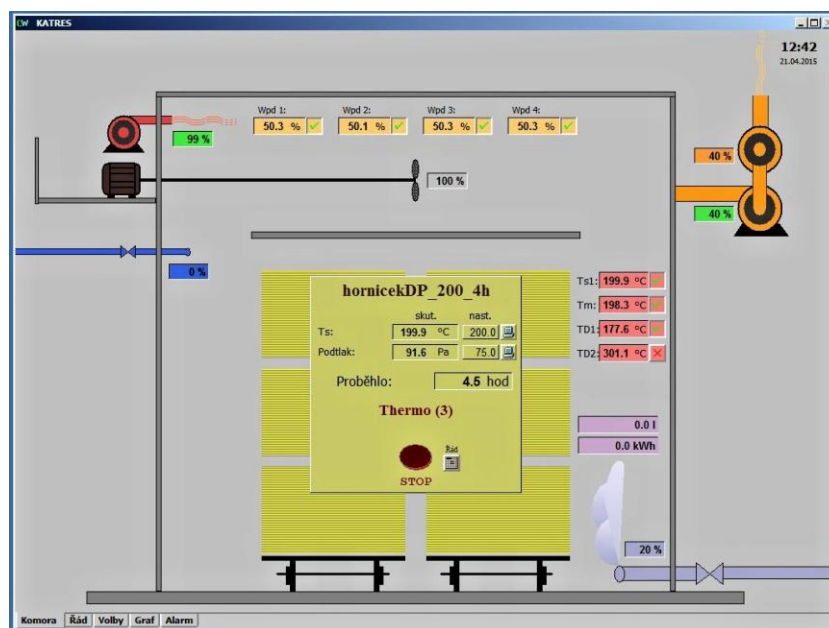
Obr. 19 Režim tepelné modifikace skupiny 4 – teplota 200 °C, čas 2 hodiny



Obr. 20 Režim tepelné modifikace skupiny 5 – teplota 200 °C, čas 4 hodiny



Obr. 21 Schéma vybavení a zapojení komory na tepelnou úpravu dřeva (foto autor)



Obr. 22 Základní grafické rozhraní ovládacího software během procesu tepelné modifikace (foto autor)

4.2.1.2 Modifikační komora a řízení procesu

Modifikace probíhala v automatizované poloprovozní laboratorní komoře pro tepelnou modifikaci dřeva, kde byly vzorky uloženy do hráně (Obr. 23). Schématické zobrazení komory na tepelnou modifikaci dřeva, uvádějící hlavní komponenty (komora, topné spirály, odtahový ventilátor se zpětnou klapkou, vnitřní oběhový ventilátor, vyvíječ páry, řídicí systém a PC) je patrné na Obr. 21.

Proces je řízen pomocí počítače s řídicím software. Tento software umožňuje řízení, monitorování a přenos dat aktuálně z průběhu procesu. Jeho grafické rozhraní zobrazuje Obr. 22. V úvodní záložce „KOMORA“ jsou zobrazeny hlavní komponenty zařízení a nejdůležitější informace o procesu. Záložka „ŘÁD“ slouží pro nastavení vlastních procesů tepelné modifikace, tj. teplotních řádů (rychlost nárůstu teploty, rychlost otáček ventilátoru, množství páry, podtlak, atd.). Záložka „GRAF“ poskytuje aktuální grafický výstup (aktualizace každých 10 sekund) zobrazující průběh teplot a dalších sledovaných parametrů. Během procesu je možné jednotlivé parametry manuálně upravit dle požadavků.

4.2.2 Zkušební vzorky

Modifikované hrubé přířezy (Obr. 23) byly z komory na tepelnou modifikaci dřeva vyjmuty při teplotě pod 100°C a umístěny do sušárny dřeva s nastavitelnými teplotními režimy, kde bylo zajištěno jejich pozvolné vychladnutí a poté byly vzorky klimatizovány v běžných podmínkách. Pozvolným klimatizováním se zamezilo vzniku trhlin a jiných defektů, které mohly vzniknout v důsledku teplotních gradientů v průřezu zkušebních vzorků.

Z modifikovaného materiálu byly vyrobeny čtyři skupiny zkušebních těles. Celkem bylo tedy připraveno pět skupin zkušebních vzorků a to vzorky referenční (1), modifikované při režimech 160 °C a 2 hod (2), 160 °C a 4 hod (3), 200 °C a 2 hod (4) a 200 °C a 4 hod (5). Každá skupina obsahovala 15 vzorků. Při výrobě se dbalo na vymanipulování a odstranění vad (suky, trhliny, atd.) a odklon vláken do 10°. Nejprve byly vyrobeny vzorky pro zkoušku pevnosti v ohybu (Obr. 24), ze kterých se po následně připravili vzorky na další zkoušky.

Při výrobě sad vzorků pro jednotlivé testy vlastností zkoumaného materiálu, kromě trvanlivosti, se vycházelo z norem BS (British Standards Institution 1957). Vzorky pro test trvanlivosti byly vyrobeny podle doporučení Bravery (Bravery 1978). Důvodem pro výběr těchto norem byly omezené rozměry výchozích výřezů.

4.3 Výzkum vlastností materiálu

Rozsah experimentálních měření byl zvolen tak, aby konečné výsledky poskytly komplexní přehled o fyzikálně-mechanických vlastnostech referenčního a modifikovaného materiálu.

Veškeré experimenty byly prováděny podle platných norem BS (British Standards) a ČSN EN.

Při experimentech bylo použito laboratorní sušárny s rozsahem teplot 5–250 °C (Sanyo MOV 112) s přesností udržování teploty ± 1 °C, laboratorní elektronické váhy (Radwag 210R2) s přípustnou chybou vážení 0,001 g, laboratorní klimatizační komory (Sanyo MTH 2400), digitálního posuvného měřítka (Mitutoyo 150) s přesností měření na 0,01 mm a skleněného exsikátoru.



Obr. 23 Hrubé přířezy narovnané do hrání v komoře po tepelné modifikaci (foto autor)



Obr. 24 Vzorky připravené pro zkoušku ve statickém ohybu (foto autor)

4.3.1 Výzkum fyzikálních vlastností materiálu

4.3.1.1 Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace

Při tepelné modifikaci dřeva dochází k nevratným změnám v jeho chemickém složení a to při degradaci složek buněčných stěn a extraktivních látek. V závislosti na úbytku zejména polysacharidických složek vlivem působení vysoké teploty dochází ke snížení hmotnosti dřeva. Velikost ztráty hmotnosti závisí na teplotě použité při procesu modifikace a je až 15 %. Vyšší teplota znamená vyšší hmotnostní úbytek (Rapp 2001; Militz 2002; Patzelt et al. 2003; Hill 2006; Esteves a Pereira 2009; Čermák 2013). Hmotnostní úbytek vlivem tepelné modifikace je často označován jako hlavní parametr určující stupeň, popř. kvalitu, tepelné modifikace dřeva (Čermák et al. 2014).

Soubory hrubých přířezů o pěti kusech z každé testovací skupiny byly vysušeny při teplotě 103 °C na 0% vlhkost a zváženy. Pak byly tyto soubory přidány mezi ostatní vzorky do jednotlivých sad a tepelně modifikovány dle zvolených režimů.

Další vážení vybraných souborů hrubých přířezů proběhlo po tepelné modifikaci. Klimatizované vzorky byly znovu vysušeny na 0% vlhkost při teplotě 103 °C a zváženy. Z rozdílu hmotností se poté stanovil hmotnostní úbytek vlivem tepelné modifikace dle vzorce:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

Δm ...	rozdílnost hmotnosti (%)
m_1 ...	hmotnost při 0% vlhkosti před modifikací (g)
m_2 ...	hmotnost při 0% vlhkosti po modifikaci (g)

4.3.1.2 Hustota

Můžeme jí definovat jako objem tělesa, ve kterém je spojitě nebo nespojitě rozložena hmotnost. Při jejím zjišťování vznikají problémy se změnami objemu a hmotností dřeva kvůli změnám vlhkosti dřeva. Hustota dřeva je důležitá veličina pro porovnávání mechanických a fyzikálních vlastností dřeva (Niemz 1993).

Velikost vzorků pro získání hustoty byla 14×14×10 mm³. V průběhu každého experimentu byla měření vlastností vzorků pro daný test získána hustota dle vzorce:

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w}$$

ρ_w ...	hustota při dané vlhkosti (kg/m ³)
m_w ...	hmotnost při dané vlhkosti (kg)
V_w ...	objem při dané vlhkosti (m ³)

4.3.1.3 Vlhkost

Pokud je ve dřevě přítomna voda, jedná se pak o vlhkost dřeva.

Absolutní vlhkost dřeva se využívá k určení charakteristiky fyzikálních a mechanických vlastností dřeva (Horáček 1998).

Další vlhkostí, která se velmi často zjišťuje u dřeva je vlhkost rovnovážná. Jedná se o vlhkost, která odpovídá teplotě a vlhkosti vzduchu okolního prostředí. Pro výzkum uplatnění výrobku na bázi dřeva je to důležitá vlastnost. Vzorec pro výpočet je shodný s vzorcem pro získání absolutní vlhkosti dřeva. Rozměry vzorků pro získání rovnovážné vlhkosti byly $14 \times 14 \times 20 \text{ mm}^3$ a tento test probíhal souběžně s testem sesychání (viz 4.3.1.5). Vzorky byly umístěny do klimatizační komory s prostředím o vlhkosti 65 % a teplotě 20 °C. Těmto podmínkám byly vystaveny týden a poté změřeny a zváženy. Dalším stupněm pokusu bylo prostředí exsikátoru naplněného destilovanou vodou s 99% vlhkostí vzduchu a teplotou 20 °C. Po dalším týdnu došlo k zvážení a změření rozměrů vzorků. Nakonec vzorky klimatizovaly v pokojových podmínkách a poté byly vysušeny na 0% vlhkost při teplotě 103 °C a znovu proběhlo jejich vážení a měření rozměrů.

V průběhu každého experimentu byla měřením vlastností vzorků pro daný test získávána absolutní vlhkost dřeva.

Absolutní vlhkost (%) byla zjišťována dle vzorce:

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100$$

m_w ... hmotnost vlhkého dřeva (g)

m_0 ... hmotnost absolutně suchého dřeva (g)

4.3.1.4 Bobtnání

Jedná se o schopnost dřeva zvětšovat svoje lineární rozměry, plochu nebo objem při přijímání vody vázané v buněčných stěnách v rozsahu vlhkosti od 0 % po mez hygroscopicity (mez nasycení buněčných stěn) (Horáček 1998).

Test byl prováděn v rámci testu vyluhovatelnosti (viz 4.3.1.8), kdy byly sady vzorků postupně vystaveny šesti cyklům máčení a sušení. Vysušené vzorky o 0% vlhkosti byly změřeny a zváženy a poté namočený v destilované vodě po dobu 24 hodin při pokojové teplotě. Po zvážení a změření vzorků, byly vzorky vysušeny na 0% vlhkost ve 2 fázích. Při teplotě 40 °C po dobu 24 hod a následně při teplotě 103 °C také po dobu 24 hodin. Takto pozvolné sušení bylo zvoleno s ohledem na eliminování vzniku možných trhlin. Poté byly vzorky znovu změřeny a zváženy. Tento cyklus byl 6krát opakován. Velikost vzorků byla $14 \times 14 \times 10 \text{ mm}^3$.

Bobtnání (%) bylo zjišťováno dle vzorce:

$$\alpha_i = \frac{a_{iw_2} - a_{iw_1}}{a_{iw_1}} \times 100$$

- a ... rozměr tělesa, jeho plocha nebo objem (m, m², m³)
- i ... index udávající směr, plochu nebo objem
- w₁ ... vlhkost před bobtnáním (%)
- w₂ ... vlhkost po ukončení bobtnání (%)

4.3.1.5 *Sesychání*

Je to proces, při kterém se zmenšují lineární rozměry, plocha nebo objem tělesa v závislosti na ztrátě vody vázané v buněčných stěnách (Horáček 1998).

Pokus sesychání probíhal souběžně s pokusem zkoumajícím rovnovážnou vlhkost materiálu (viz 4.3.1.3).

Sesychání (%) bylo zjišťováno dle vzorce:

$$\beta_i = \frac{a_{iw_2} - a_{iw_1}}{a_{iw_1}} \times 100$$

- a ... rozměr tělesa, jeho plocha nebo objem (m, m², m³)
- i ... index udávající směr, plochu nebo objem
- w₁ ... vlhkost před sesycháním (%)
- w₂ ... vlhkost po ukončení sesycháním (%)

4.3.1.6 *Účinnost omezení bobtnání*

Index účinnosti omezení bobtnání je velmi známou metodou pro určování rozměrové stabilizace procesem. Je založen na porovnání bobtnání modifikovaného a nemodifikovaného materiálu. Pokud je bobtnání obou materiálů stejné, tak je index nulový. V případě, kdy je nulové bobtnání modifikovaného materiálu, tak index je 100 % (Santos 2000).

Pro určení indexu účinnosti omezení bobtnání je nutné zkoumané vzorky klimatizovat v podmínkách určitého prostředí. V případě modifikovaných materiálů bývá ale tato klimatizace časově náročná. Proto je zde možnost vzniku rozdílnosti výsledků v závislosti na době klimatizace. Kvůli lepší výpovědi výsledků je tedy nutné jejich porovnání například s grafickým znázorněním výsledků bobtnání (Santos 2000; Čermák et al. 2015).

Při určování účinnosti omezení bobtnání se vycházelo z hodnot získaných testem bobtnání (viz 4.3.1.4).

Účinnost omezení bobtnání (%) byla zjišťována dle vzorce:

$$\text{ÚOB}_i = \frac{\alpha_{iu} - \alpha_{im}}{\alpha_{iu}} \times 100$$

α ...	bobtnání tělesa; rozměr, jeho plocha nebo objem (%)
i ...	index udávající směr, plochu nebo objem
u ...	nemodifikované dřevo (-)
m ...	modifikovaný materiál (-)

4.3.1.7 Účinnost omezení sesychání

Koeficient účinnosti omezení sesychání není běžnou metodou pro určování rozměrové stability způsobené procesem tepelné úpravy. Zakládá se na porovnání sesychání modifikovaného a nemodifikovaného dřeva. V případě, že je sesychání obou materiálů stejné, tak je index nulový. Pokud je nulové sesychání modifikovaného materiálu, tak koeficient je 100 %.

Pro určení koeficientu účinnosti omezení sesychání je nutné zkoumané vzorky vystavit podmínkám určitého prostředí. V případě modifikovaných materiálů bývá ale tato klimatizace časově náročná. Proto zde mohou vznikat rozdílnosti výsledků v závislosti na době klimatizace. Kvůli jejich lepší výpovědi je tedy nutné porovnání například s grafickým výstupem výsledků sesychání (Cao et al. 2012).

Při určování koeficientu účinnosti omezení sesychání se vycházelo z hodnot získaných testem sesychání (viz 4.3.1.5).

Účinnost omezení sesychání (%) byla zjišťována dle vzorce:

$$\text{ÚOB}_i = \frac{\beta_{iu} - \beta_{im}}{\beta_{iu}} \times 100$$

β ...	bobtnání tělesa; rozměr, jeho plocha nebo objem (%)
i ...	index udávající směr, plochu nebo objem
u ...	nemodifikované dřevo (-)
m ...	modifikovaný materiál (-)

4.3.1.8 Ztráta hmotnosti vlivem vyluhování

Tepelnou modifikací vznikají ve dřevě různé extraktivní látky vlivem degradace jeho chemických složek. Tyto extraktivní látky se pak z materiálu velmi snadno vyluhují a hmotnost materiálu se mění po jednotlivých cyklech máčení. Jejich obsah v materiálu se zvyšuje s teplotou úpravy, a proto lze předpokládat vyšší hodnoty vyluhování po použití vyšší teploty k modifikaci (Čermák et al. 2015).

Test vyluhování probíhal spolu s testem bobtnání (viz 4.3.1.4).

Vyluhovatenost byla zjišťována dle vzorce:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

Δm ...	rozdíl hmotnosti (%)
m_1 ...	hmotnost při 0% vlhkosti před máčením (g)
m_2 ...	hmotnost při 0% vlhkosti po máčení (g)

4.3.2 Výzkum mechanických vlastností materiálu

4.3.2.1 Pevnost ve statickém ohybu

Jedná se o odolnost dřeva proti trvalému porušení vlivem vnějšího zatížení. Pokud je pevnost překročena dojde k porušení soudržnosti struktury dřeva.

Výsledek této zkoušky je velmi důležitý pro posuzování budoucího využití ve výrobcích. Dřevo o vysoké pevnosti v ohybu se s výhodou používá pro vodorovné nosné konstrukce. Je zde totiž lepší poměr pevnosti a váhy než v případě například oceli (Havířová 2006).

Namáhání dřeva ohybem je velmi komplikovaný děj, při kterém ve dřevě vzniká napětí deformující strukturu několika způsoby. Prvním způsobem je stlačení na vnitřní straně tělíska za působení tlakového napětí, druhým způsobem působícím na vnější straně tělíska je pak napětí tahové. Mezi těmito deformačními zónami se nachází nedeformovaná část zvaná neutrální vrstva (osa). V této části je tedy napětí rovno nule; zvětšuje se směrem k okrajům tělíska (Požgaj 1997, Trávník 2005).

Patnáct vzorků o transformovaných rozměrech 14×14×210 mm³ a s odklonem vláken do 10° z každé skupiny bylo podrobeno zkoušce pevnosti ve statickém tříbodém ohybu s následným vypočtením hodnoty modulu pružnosti (viz 4.3.2.2). Vzorky byly klimatizovány v prostředí s 65% relativní vlhkostí vzduchu při teplotě 20 °C a před testem změřeny a zváženy. Po testu byly vzorky vysušeny na vlhkost 0% a opět změřeny a zváženy. Celkem bylo tedy pro tuto zkoušku použito 75 kusů zkušebních vzorků.

Zkouška tříbodého ohybu byla odvozena od normy BS 373 (British Standard Institution 1957) a provedena na univerzálním zkušebním stroji ZwickZ050 s extenzometrem pro snímání deformací napojeným na stolní počítač s programem testXpert, který měření vyhodnocoval. Zatížení působilo kolmo na vlákna tělíska v tangenciálním směru a vzdálenost podpor s poloměrem 15 mm byla 196 mm.

Mez ohybové pevnosti byla zjišťována podle vzorce:

$$\sigma_{\max} = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

σ_{\max} ...	maximální napětí (MPa)
F ...	působící síla (N)
l ...	vzdálenost podpěr (mm)
b ...	šířka zkušebního tělesa (mm)
h ...	výška zkušebního tělesa (mm)

4.3.2.2 Modul pružnosti

Je jednou z materiálových charakteristik popisujících pružnost dřeva. To je schopnost materiálu odolávat deformacím a nabývat původní rozměry po ukončení působení vnějších sil (Matovič 1993).

Vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružným deformacím. Vyšší modul pružnosti znamená nutnost vyššího napětí potřebného k vyvolání deformace. Hodnotu modulu pružnosti výrazně ovlivňuje hustota a vlhkost dřeva. Zvyšuje se, pokud se zvyšuje i hustota. S rostoucí vlhkostí se ale snižuje (Požgaj 1997).

Modul pružnosti (MPa) byl vypočten z lineární části zatěžovacího diagramu získaného testem ohybové pevnosti (viz 4.3.2.1) podle vzorce:

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

F ...	působící síla (N)
l ...	vzdálenost podpěr (mm)
b ...	šířka zkušebního tělesa (mm)
h ...	výška zkušebního tělesa (mm)
Δy ...	průhyb tělesa (mm)

4.3.2.3 Pevnost v tlaku podél vláken

Pevnost dřeva charakterizuje odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení a vyjadřuje se napětím na mezi pevnosti.

Z praktického pohledu je tlaková pevnost ve směru vláken velmi důležitou vlastností dřeva. Při zatížení dochází k deformaci vykazující zkrácení délky tělesa. Míra deformace závisí na mnoha aspektech zmíněných v kap. 4.3.2.1. U suchého dřeva s vysokou hustotou dochází k porušení ve formě smyku v jeho struktuře, u dřeva vlhkého s nízkou hustotou dojde k otlačení čelních ploch nebo k vybočení stěn tělesa (Požgaj 1997).

Test pevnosti v tlaku podél vláken byl proveden na patnácti vzorcích z každé skupiny. Celkem tedy bylo testováno 75 kusů vzorků o odvozených rozměrech $14 \times 14 \times 42 \text{ mm}^3$. Před testem byly vzorky klimatizovány při vlhkosti 65 % a teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a změřeny a zváženy. Po testu byly vzorky vysušeny na 0% vlhkost a znovu zváženy a změřeny.

Experiment byl prováděn pomocí univerzálního zkušebního stroje ZwickZ050 s extenzometrem pro snímání deformací, jehož čelisti byly umístěny na radiální plochy zkušebního tělíska. Test byl odvozen od normy BS 373.

Mez tlakové pevnosti byla zjišťována podle vzorce:

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max}}{a \times b}$$

σ_{\max} ...	maximální napětí (MPa)
F ...	působící síla (N)
a, b ...	příčné rozměry tělesa (mm)

4.3.3 Výzkum odolnosti materiálu vůči dřevokazné houbě

Degradovatelnost vlivem působení biotických škůdců je přirozenou vlastností dřeva. Pokud okolní podmínky působící na dřevo způsobí stav, který je vyhovující pro jejich aktivitu a rozvoj, startují ve dřevě degradační procesy. Mění se tak fyzikální a mechanické vlastnosti napadeného dřeva (Svatoň 2000). Všeobecně známým faktem je, že odolnost dřeva proti napadení a poškození biotickými škůdci závisí na jeho charakteru a expozičních podmínkách (vlhkosti, teplotě atd.) (Reinprecht 1998).

Houby jsou celkově nejčastějšími škůdci dřeva. Napadají dřevo živé i neživé, povrchově nebo hloubkově a způsobují zbarvení a hnilobu, rozklad dřeva. Podhoubí proniká svými vlákny přes pletivo dřeva a za působení enzymů jej rozrušuje (Požgaj 1997). Síla narušování dřevní struktury závisí na druhu houby a účinnosti enzymatických látek jejich mycelia (Balabán a Kotlaba 1970). Podle schopnosti rozkladu dřeva dělíme dřevokazné houby na parazitické, působící na živých stromech, saprofytické, napadající dřevo mrtvé a na paraziticko-saprofytické, které rozkládají živý i neživý organický substrát. Dále se vyskytují houby dřevozbarvující a plísňe, které výrazně nemění mechanické vlastnosti dřeva, avšak z fyzikálních markantně mění jeho barvu a propustnost (Reinprecht 1998). Vlastnosti dřeva výrazně mění houby dřevokazné, jejichž hyfy prorůstají dřevo a rozkládají buď jen jeho polysacharidickou složku anebo i lignin. Podle tohoto chování rozlišujeme dřevokazné houby na houby bílého a hnědého tlení. Houby tlení bílého odbourávají ve dřevě celulózu, hemicelulózu a lignin. Dřevo tedy výrazně světlá, objevují se v něm nápadné komůrky a stává se vláknitým a drobivým. Oproti tomu, houby hnědého tlení odbourávají hlavně polysacharidickou složku dřeva, které pak získává hnědou barvu zbytků ligninu. Je křehké, lehce se láme a ubývá na váze a objemu. Často kostkovitě praská (Rypáček 1957).

Pro tento test byla vyrobena tělíska o velikosti 10×5×30 mm³ (Bravery 1978) ze všech pěti skupin vzorků. Celkem tedy bylo testováno 45 vzorků (9 kusů z každé skupiny) a pro porovnání výsledků dalších 21 referenčních vzorků buku. Odklon vláken byl menší než 10°.

Vzorky byly vysušeny na 0% vlhkost při teplotě 103 °C, zváženy a poté klimatizovány několik dní v prostředí s vlhkostí 65 % a teplotou 20 °C. Klimatizované vzorky byly dále sterilizovány a umístěny do nádob s již rozvinutým myceliem houby bílého tlení *Outkovky pestré* (*Trametes versicolor*). Při přípravě živné půdy pro rozvoj mycelia se vycházelo z normy ČSN EN 113. Vzorky byly působení houby vystaveny po dobu šesti týdnů. Po uplynutí této doby byly vzorky šetrně vyjmuty z nádob, očištěny od mycelia, zváženy a umístěny do laboratorní sušárny kvůli vysušení na 0% vlhkost při teplotě 103 °C. Veškerá manipulace s houbovou kulturou byla prováděna ve sterilním laboratorním boxu. Na konec byly vysušené vzorky zváženy, aby mohl být vyhodnocen hmotnostní úbytek způsobený degradací houbou dle vzorce:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

Δm ...	rozdíl hmotnosti (%)
m_1 ...	hmotnost při 0% vlhkosti před modifikací (g)
m_2 ...	hmotnost při 0% vlhkosti po modifikaci (g)

4.3.4 Statistické vyhodnocení

Statistické výsledky byly zpracovány pomocí počítačových programů Statistica verze 12 a Microsoft Office Excel verze 2007.

4.3.4.1 Průměrná hodnota

Průměrná hodnota ze souboru vzorků byla zjištěna podle vzorce:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

\bar{x} ...	průměrná hodnota
x_i ...	hodnota zkoušené vlastnosti
n ...	počet vzorků

4.3.4.2 Směrodatná odchylka

Směrodatná odchylka zobrazuje informace o variabilitě zkoumaného souboru. U souboru s normálním rozdělením četnosti platí, že v určitých intervalech násobku směrodatné odchylky kolem aritmetického průměru se nachází určitá část počtu hodnot.

Směrodatná odchylka byla zjištěna podle vzorce:

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

S ...	směrodatná odchylka
\bar{x} ...	průměrná hodnota
x_i ...	hodnota zkoušené vlastnosti
n ...	počet vzorků

4.3.4.3 *Variační koeficient*

Variační koeficient slouží k porovnání variability více vzorků s různou úrovní. Omezuje vliv měrné jednotky a vliv velikosti hodnot znaku na velikost míry variability.

Variační koeficient byl zjišťován dle vzorce:

$$V = \frac{S}{\bar{x}} \times 100$$

V ...	variační koeficient (%)
S ...	směrodatná odchylka
\bar{x} ...	průměrná hodnota

4.3.4.4 *Kontrola normality dat*

Statistické vyhodnocení dat v rámci jednoho výběrového souboru pro kontrolu normálního rozdělení bylo provedeno početní metodou Shapiro-Wilksova testu na hladině významnosti $\alpha = 0,05$. Výsledky jsou tedy spolehlivé na 95 %.

Ve výsledcích (kapitola 5) je hodnocení toho testu uvedeno slovně u každého experimentu.

4.3.4.5 *Test shody středních hodnot výběrových souborů*

Jedná se o test shodnosti rozptylů založeném na srovnávání tzv. efektních a reziduálních rozptylů výběrových souborů (Drápela a Zach 2002). Používá se v případech, kdy jsou výsledky testů ovlivněny nenormalitou dat.

Zpracování dat více souborů proběhlo pomocí Kruskal-Wallisovy ANOVY opět na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

Výsledek testu shody je slovně uveden u každého experimentu v páté kapitole Výsledky.

5 Výsledky

Naměřené hodnoty z jednotlivých experimentů byly zaznamenány a zpracovány v tabulkovém procesoru. Poté proběhla statistická analýza a grafické vyhodnocení pro každou skupinu vzorků.

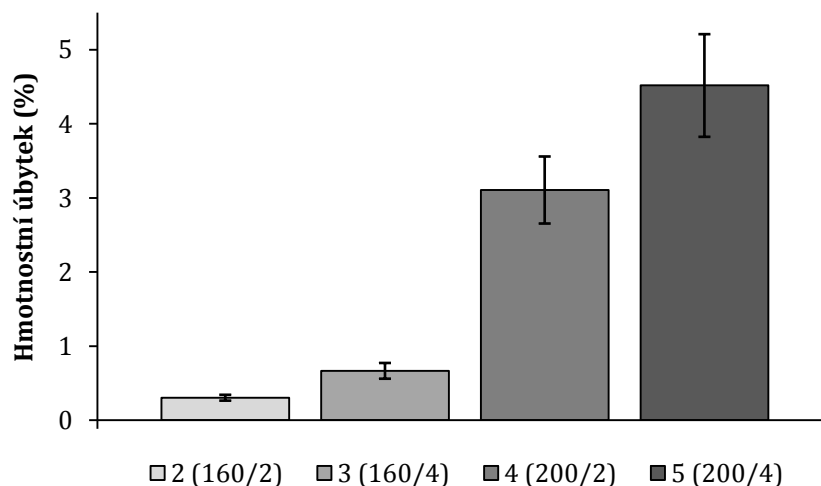
5.1 Výsledky testů fyzikálních vlastností materiálu

5.1.1 Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace

Popisná statistika změny hmotnosti vlivem tepelné modifikace jednotlivých sad vzorků je uvedena v Tab.1. Na grafickém znázornění hmotnostních úbytků (Obr. 25) můžeme pozorovat velký rozdíl mezi modifikačními režimy. Tento rozdíl je způsoben hlavně teplotou, čas modifikace nehraje až tak zásadní roli.

Tab. 1 Popisná statistika naměřených výsledků pro ztrátu hmotnosti vlivem tepelné modifikace

sada	Popisná statistika ztráty hmotnosti vlivem tepelné modifikace					
	Průměr (%)	SMODCH (%)	VAR (%)	MIN (%)	MAX (%)	MEDIAN (%)
2	0,31	0,04	12,88	0,25	0,36	0,30
3	0,67	0,11	15,87	0,56	0,84	0,63
4	3,11	0,45	14,55	2,26	3,59	3,27
5	4,52	0,69	15,32	3,60	5,74	4,44



Obr. 25 Souhrnný sloupcový graf zobrazující hmotnostní úbytky vlivem tepelné modifikace u jednotlivých skupin vzorků

Největšího průměrného hmotnostního úbytku bylo tedy dosaženo v případě sady vzorků číslo 5, tedy s nejintenzivnějším režimem modifikace, a to 4,52 %.

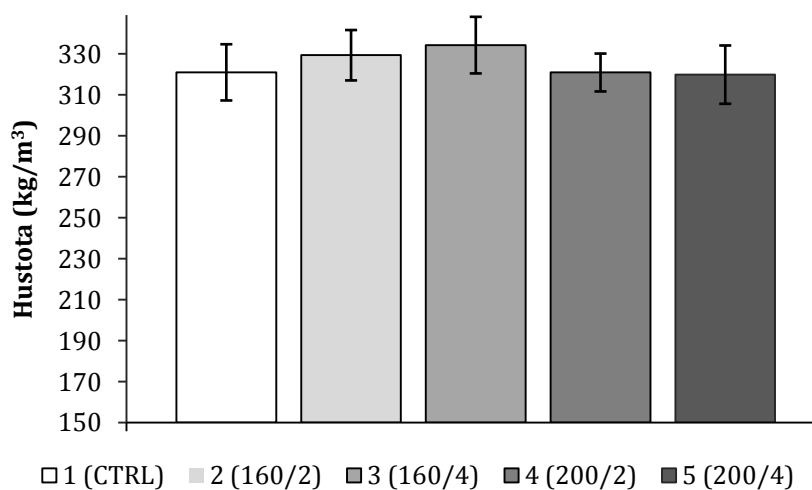
Dle výsledků testu normality jednotlivých souborů nelze zamítnout normalitu jejich dat. Po vícenásobném porovnání hodnot souborů byla zjištěna statisticky významná odlišnost v případě skupiny 2 se sadami 4 a 5 a u skupiny 3 se sadou 5.

5.1.2 Hustota

Popisnou statistiku hustoty při 0% vlhkosti zobrazuje tabulka průměrných hodnot (Tab. 2), grafické znázornění je pak zobrazeno na Obr. 26.

Tab. 2 Popisná statistika hustoty při 0% vlhkosti

Sada	Popisná statistika hustoty při vlhkosti 0 %					
	Průměr (kg/m ³)	SMODCH (kg/m ³)	VAR (%)	MIN (kg/m ³)	MAX (kg/m ³)	MEDIAN (kg/m ³)
1	321,05	13,71	4,27	298,12	352,22	317,50
2	329,40	12,30	3,73	307,82	348,62	332,28
3	334,33	13,82	4,13	309,60	352,07	335,29
4	320,98	9,25	2,88	307,43	342,89	318,93
5	319,93	14,23	4,45	293,99	338,44	323,53



Obr. 26 Souhrnný sloupcový graf zobrazující hustotu při 0% vlhkosti u jednotlivých skupin vzorků

V závislosti na úbytku hmotnosti vlivem tepelné modifikace došlo v podobném trendu i ke změně hustoty u zkoumaných vzorků. Nejnížší hustotu tedy vykazují vzorky sady 5 s nejvyšším zvoleným stupněm tepelné modifikace. Průměrná hodnota hustoty při 0% vlhkosti vzorku je 319,93 kg/m³ a je tedy nižší než hustota vzorků ze sady kontrolní, která dosahuje průměrné hodnoty 321,05 kg/m³. Naopak výsledky sad vzorků 2 a 3 se neshodují a předpokládaným vývojem a mají

vyšší průměrnou hustotu než u již zmíněných referenčních vzorků. Tato skutečnost bude dále diskutována v kapitole 6.1.2.

Z testu normality jednotlivých sad vzorků plyne nemožnost jejího zamítnutí. Vícenásobným porovnáním hodnot bylo zjištěno, že jsou statisticky nevýznamně odlišné.

5.1.3 Rovnovážná vlhkost

Průměrné hodnoty hustot vzorků při zjišťování vlhkosti v prostředí s vlhkostí 65 % a 99 % (MH) jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Průměrné hodnoty hustoty v dobách měření

Sada	Průměrné hodnoty	
	Hustota _{65%} (kg/m ³)	Hustota _{99%} (kg/m ³)
1	338,00	355,67
2	343,90	359,75
3	349,12	366,15
4	337,71	353,17
5	331,50	347,48

Rovnovážnou vlhkost sad vzorků zkoumaného materiálu vystaveného prostředí s 65% relativní vlhkostí vzduchu při 20°C zobrazuje Tab. 4 popisné statistiky průměrných hodnot. Vyšší hodnoty rovnovážné vlhkosti vzorků pak můžeme vidět v Tab. 5 popisné statistiky s průměrnými hodnotami z prostředí s vlhkostí 99 % a při teplotě 20 °C.

Rozdíly mezi modifikačními režimy jsou nejlépe patrné z grafického znázornění na Obr. 27. Znovu zde platí, že nejnižších průměrných hodnot rovnovážné vlhkosti dosahují sady vzorků modifikované teplotou 200 °C. V prostředí s 65% vlhkostí je to v porovnání s kontrolními vzorky 4,48 ku 9,45 % a v prostředí s vlhkostí 99 % je to pak 12,46 a 20,17 %.

Normalitu dat z testu RVD při 65 % vlhkosti jednotlivých souborů vzorků lze zamítnout v případě sad 2 a 4. Pro data ostatních sad vzorků normalitu nelze zamítnout. Při vícenásobném porovnání středních hodnot byl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi sadami 1 a 3, 4, 5 a dále u sad 2, 3 a 4, 5.

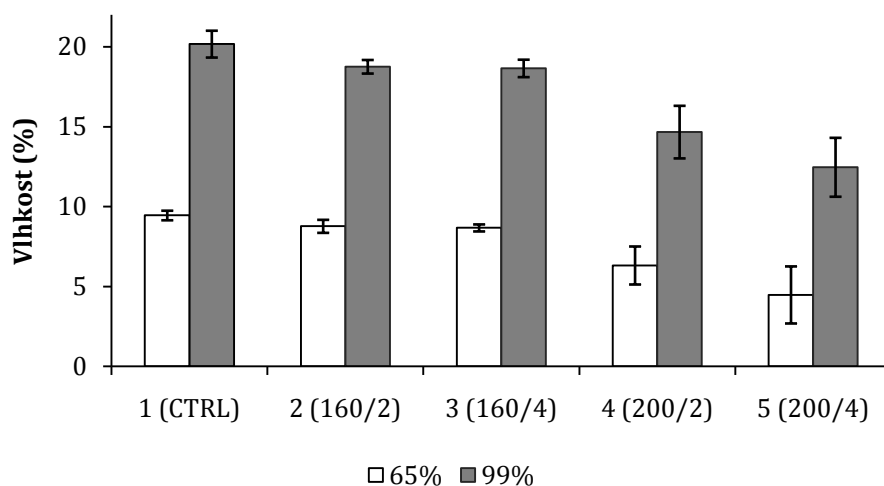
Při testu RVD v prostředí s 99% vlhkostí byly statisticky odlišné hodnoty skupin 4 a 5 s první, druhou a třetí sadou hodnot. Normalitu dat dílčích souborů nelze zamítnout v žádném z případů.

Tab. 4 Popisná statistika rovnovážné vlhkosti testovaných vzorků při 65% vlhkosti prostředí a 20°C

Sada	Popisná statistika vlhkosti při 65 % a 20°C					
	Průměr	SMODCH	VAR	MIN	MAX	MEDIAN
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	9,45	0,30	3,16	8,96	10,09	9,35
2	8,77	0,41	4,64	7,56	9,62	8,73
3	8,67	0,22	2,53	8,29	9,07	8,71
4	6,32	1,19	18,80	2,27	7,78	6,39
5	4,48	1,78	39,83	0,76	6,90	4,98

Tab. 5 Popisná statistika rovnovážné vlhkosti testovaných vzorků při 99% vlhkosti prostředí a 20°C

Sada	Popisná statistika vlhkosti při 99 % a 20°C					
	Průměr	SMODCH	VAR	MIN	MAX	MEDIAN
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	20,17	0,84	4,16	18,92	21,65	20,10
2	18,75	0,43	2,27	17,87	19,45	18,71
3	18,65	0,55	2,93	17,76	20,00	18,51
4	14,67	1,64	11,21	10,01	16,86	14,79
5	12,46	1,84	14,78	8,92	15,44	12,82



Obr. 27 Souhrnný sloupcový graf zobrazující rovnovážnou vlhkost při rozdílných podmínkách prostředí u jednotlivých skupin vzorků

5.1.4 Bobtnání a účinnost omezení bobtnání

Tab. 6 uvádí průměrné hodnoty hustoty vzorků ze všech cyklů po vysoušení na 0% vlhkost, po máčení a také průměrnou maximální vlhkost.

Tab. 6 Průměrné hodnoty hustot sad vzorků při minimální a maximální vlhkosti včetně jejich vlhkosti

Sada	Průměrné hodnoty po vysoušení		Průměrné hodnoty po máčení	
	Hustota ₀ (kg/m ³)	Hustota _w (kg/m ³)	Hustota _w (kg/m ³)	Vlhkost (%)
1	314,48	708,70	708,70	149,01
2	321,29	649,32	649,32	123,11
3	327,47	663,18	663,18	123,61
4	316,43	621,17	621,17	111,61
5	314,82	605,14	605,14	105,90

Rozměrová změna bobtnáním a účinnost omezení bobtnání byla sledována v rámci šesti cyklů máčení a sušení vzorků. Bobtnání v objemu při všech cyklech zobrazuje Tab. 7 průměrných hodnot se směrodatnými odchylkami.

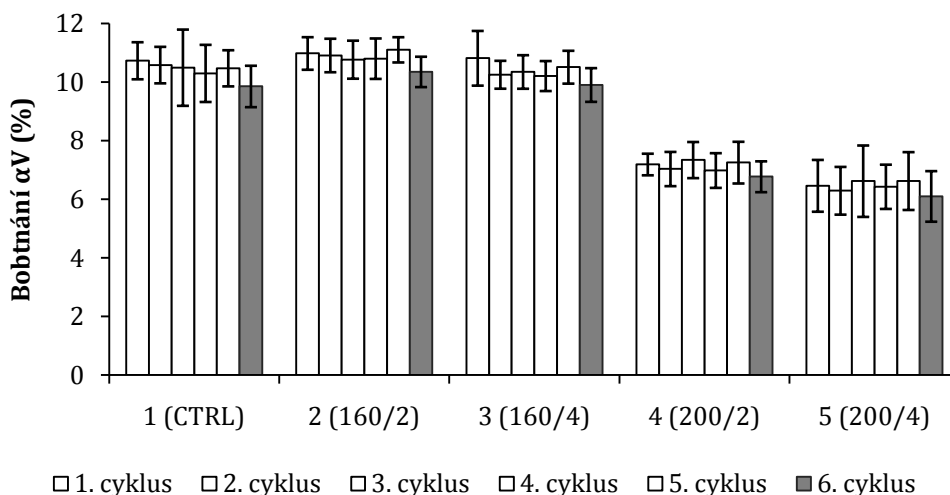
Odlišnosti můžeme sledovat jak mezi režimy modifikace tak mezi zmíněnými cykly máčení a sušení. Velmi dobře pozorovatelné je to na obrázku grafu (Obr. 28).

Vzhledem ke statistickému vyhodnocení můžeme říci, že ve všech cyklech bylo v jednotlivých skupinách vzorků dosaženo přibližně stejných hodnot bobtnání. Tomuto vývoji se budu blíže věnovat v diskuzi (6.1.4). Normalitu dat nelze zamítnout u žádného souboru hodnot a neparametrické vícenásobné porovnání hodnot ukázalo statisticky významný rozdíl mezi skupinami 4, 5 a 1, 2, 3.

Tab. 7 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky bobtnání v objemu v jednotlivých cyklech

Sada	Průměrné hodnoty bobtnání αV (%)					
	1. cyklus	2. cyklus	3. cyklus	4. cyklus	5. cyklus	6. cyklus
1	10,73 (0,6)	10,58 (0,6)	10,49 (1,3)	10,30 (1,0)	10,47 (0,6)	9,85 (0,7)
2	10,98 (0,6)	10,91 (0,6)	10,76 (0,7)	10,80 (0,7)	11,10 (0,4)	10,35 (0,5)
3	10,81 (0,9)	10,25 (0,5)	10,35 (0,6)	10,21 (0,5)	10,51 (0,6)	9,90 (0,6)
4	7,19 (0,4)	7,03 (0,6)	7,34 (0,6)	6,98 (0,6)	7,25 (0,7)	6,77 (0,5)
5	6,46 (0,9)	6,29 (0,8)	6,62 (1,2)	6,43 (0,8)	6,62 (1,0)	6,10 (0,9)

Nejnižší hodnoty vykazovaly vzorky skupiny 5, a to 6,46 % v prvním cyklu a 6,10 % v cyklu posledním, šestém. Maximální bobtnání 10,98 % bylo zaznamenáno u vzorků druhé skupiny v prvním cyklu. Mezi jednotlivými cykly docházelo také při vysoušení k sesychání vzorků, které však dosahovalo jen minimálních hodnot. Tento průběh je možné pozorovat na Obr. 29. Nejvíce seschly vzorky čtvrté a páté skupiny po šestém máčení, a to o 1,37 a 1,39 %. Podobné výsledné hodnoty také vykazovaly vzorky skupin číslo 1 a 3; 0,69 a 0,65 %. Nejméně seschly vzorky druhé skupiny, a to jen o 0,16 %.

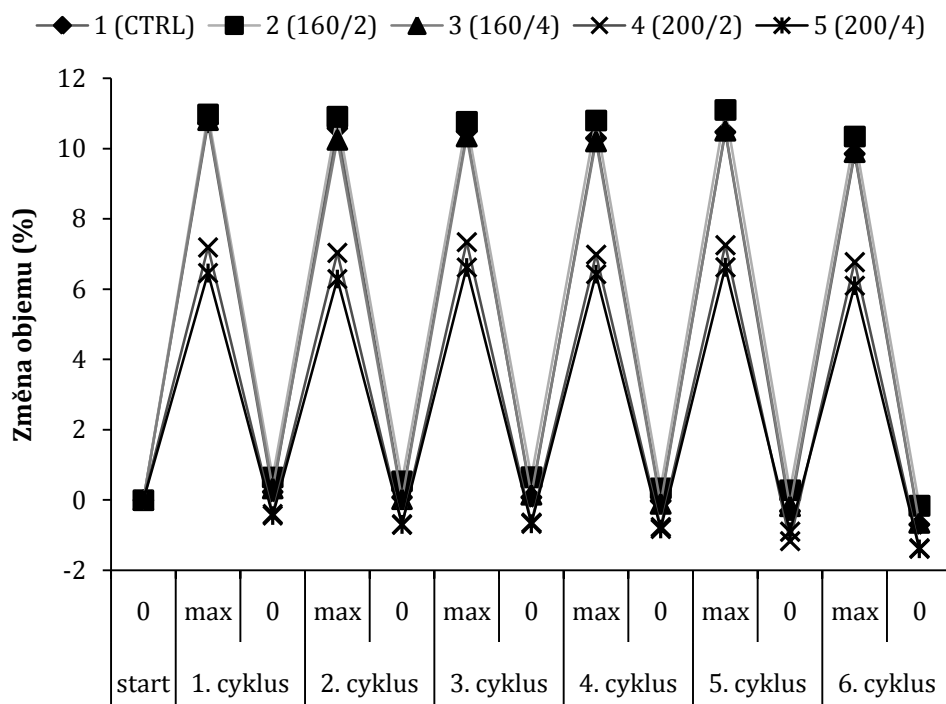


Obr. 28 Souhrnný sloupcový graf bobtnání v objemu vzorků ve všech šesti cyklech

Průběh účinnosti omezení bobtnání u dílčích cyklů máčení a sušení zobrazuje Obr. 30.

Výsledky dosahují u všech cyklů přibližně stejných hodnot, k čemuž přispívá jejich velká variabilita reprezentovaná uvedenými směrodatnými odchylkami. Vzhledem k výsledkům testu normality nelze zamítnout normální rozdělení dat. Vícenásobné porovnání středních hodnot odhalilo významný rozdíl mezi hodnotami sad 2, 3 a 4, 5.

Nejvyšších hodnot účinnosti omezení bobtnání bylo dosaženo u skupiny s posledním provedeným stupněm modifikace. U skupiny číslo 5 byla tedy nejvyšší naměřená hodnota 40,53 % v druhém cyklu. V případě 2. a 3. skupiny vzorků byly zaznamenány překvapivé výsledky. Jejich hodnocení a rozbor bude uveden v diskuzi v kapitole 6.1.4.

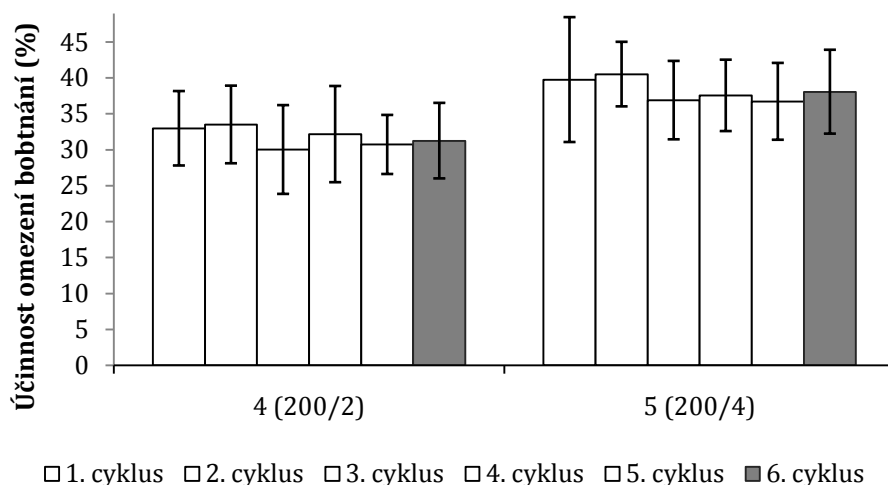


Obr. 29 Souhrnný spojnicový graf reprezentující změnu objemu vzorků při jednotlivých cyklech

V Tab. 8 jsou dále uvedeny hodnoty průměrných hodnot koeficientu účinnosti omezení bobtnání a jejich směrodatné odchylky ze všech cyklů.

Tab. 8 Průměrné hodnoty účinnosti omezení bobtnání v objemu a jejich směrodatné odchylky při jednotlivých cyklech

Sada	Průměrné hodnoty účinnosti omezení bobtnání (%)					
	1. cyklus	2. cyklus	3. cyklus	4. cyklus	5. cyklus	6. cyklus
2	-2,32 (5,2)	-3,09 (5,4)	-2,61 (6,2)	-4,88 (6,7)	-6,02 (4,1)	-5,04 (5,3)
3	-0,79 (8,7)	3,12 (4,5)	1,38 (5,5)	0,88 (5,0)	-0,36 (5,4)	-0,51 (5,8)
4	32,99 (3,4)	33,52 (5,5)	30,03 (5,9)	32,18 (5,8)	30,73 (6,8)	31,27 (5,3)
5	39,77 (8,2)	40,53 (7,7)	36,91(9,9)	37,57 (7,3)	36,74 (9,4)	38,08 (8,8)



Obr. 30 Souhrnný sloupcový graf účinnosti omezení bobtnání v objemu vzorků čtvrté a páté skupiny během šesti cyklů

5.1.5 Sesychání a účinnost omezení sesychání

Průměrné hodnoty hustot vzorků při zjišťování sesychání z prostředí s vlhkostí 99 % na konečnou 0% vlhkost vzorků jsou uvedeny v Tab. 9.

Tab. 9 Průměrné hodnoty hustoty v době měření

Sada	Průměrné hodnoty	
	Hustota _{99%} (kg/m ³)	Hustota _{0%} (kg/m ³)
1	355,67	318,01
2	359,75	324,49
3	366,15	330,08
4	353,17	324,56
5	347,48	323,78

Průměrné hodnoty sesychání vzorků v objemu s vlhkostí získanou v prostředí s 99% vlhkostí na vlhkost 0 % byly vyhodnocené popisnou statistikou a jsou uvedeny v Tab. 10.

U hodnot čtvrté sady lze kvůli výsledku testu normality zamítnout jejich normalitu. Zbylé sady vykazují data, u kterých normalitu nelze zamítnout. V případě neparametrického vícenásobného porovnání středních hodnot byl zjištěn významný rozdíl mezi čtvrtou, první a druhou sadou a dále mezi sadami číslo 5, 1, 2 a 3.

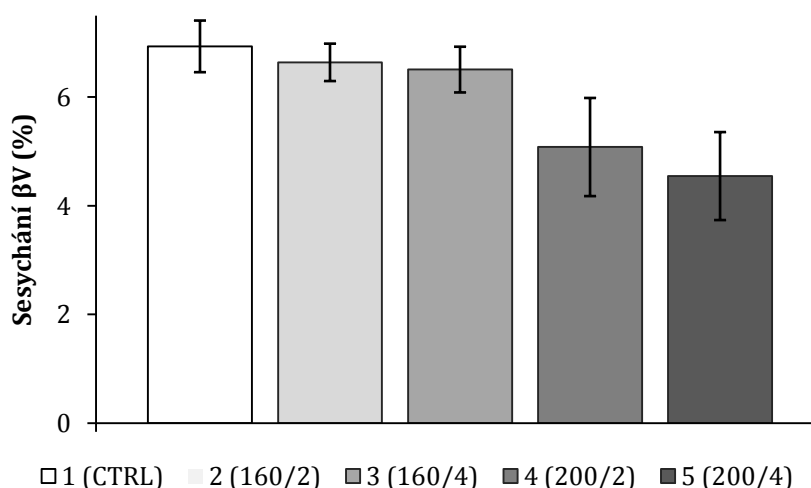
Obrázek Obr. 31 sloupcového souhrnného grafu názorně zobrazuje rozdíly mezi režimy modifikace. Na dalším Obr. 32 je uveden průběh testu sesychání, kde první část tvoří bobtnání při zvýšení vlhkosti prostředí z 65 % na 99 % a ve druhé části se nachází vlastní sesychání při snížení získané vlhkosti sušením na 0%.

V konečných výsledcích se projevil stupeň modifikace. Nejnižších hodnot sesychání 4,55 % dosáhly vzorky sady 5. Referenční vzorky seschly naopak nejvíce, a to o 6,94%.

Pro úplnost výsledků testu ještě uvedu i hodnoty zmíněného bobtnání v objemu při zvýšení vlhkosti okolního prostředí. Pro skupiny vzorků 1, 2, 3, 4 a 5 to bylo 4,35 %, 4,37 %, 4,11 %, 3,12 % a 2,68 %.

Tab. 10 Popisná statistika sesychání v objemu testovaných vzorků

Sada	Popisná statistika sesychání					
	Průměr (%)	SMODCH (%)	VAR (%)	MIN (%)	MAX (%)	MEDIAN (%)
1	6,94	0,47	6,85	8,19	6,39	6,82
2	6,64	0,34	5,18	7,25	6,00	6,64
3	6,51	0,42	6,46	7,36	5,93	6,38
4	5,08	0,90	17,76	7,06	3,23	4,93
5	4,55	0,81	17,79	6,38	2,72	4,72

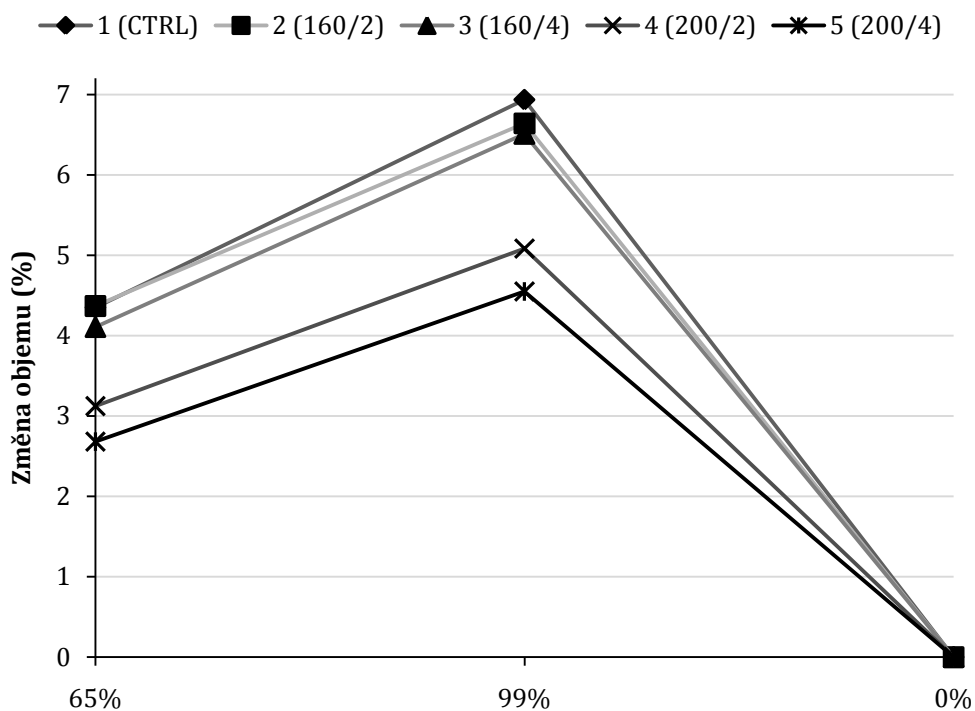


Obr. 31 Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty sesychání v objemu

Tabulka (Tab. 11) zobrazuje popisnou statistiku průměrných hodnot koeficientu účinnosti omezení sesychání. Grafické znázornění rozdílů mezi jednotlivými skupinami vzorků je uvedeno na Obr. 33.

Největší účinnost na omezení sesychání měl režim tepelné úpravy u páté sady vzorků, a to 34,41%. Hodnoty ÚOS se v případě skupin 2 a 3 lišily jen o 1,92 %.

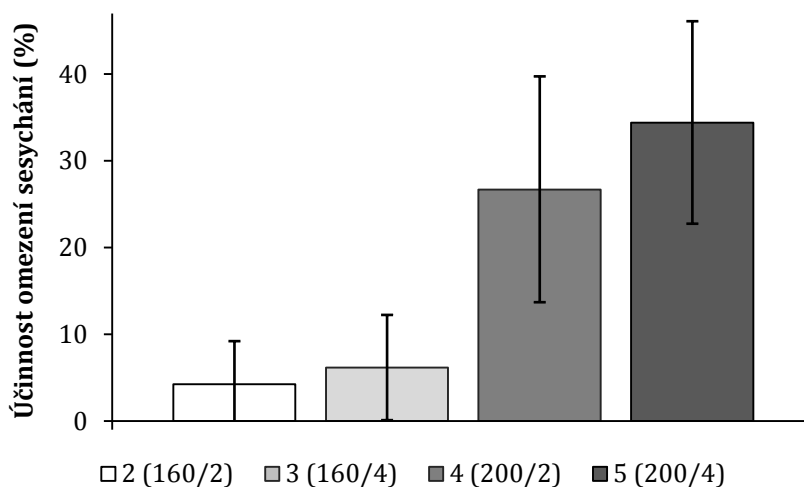
Statisticky významný rozdíl po vícenásobném porovnání byl mezi hodnotami skupin 2, 3 a 4, 5. Normální rozdělení nevykazují pouze data sady 4, hodnoty sad dalších mají normální rozdělení.



Obr. 32 Souhrnný spojnicový graf znázorňující změnu objemu vzorků v průběhu testu sesychání

Tab. 11 Popisná statistika účinnosti omezení sesychání v objemu testovaných vzorků

Sada	Popisná statistika účinnosti omezení sesychání					
	Průměr (%)	SMODCH (%)	VAR (%)	MIN (%)	MAX (%)	MEDIAN (%)
2	4,24	4,96	117,00	-4,59	13,46	4,22
3	6,16	6,07	98,55	-6,20	14,45	7,94
4	26,71	13,02	48,75	-1,85	53,39	28,86
5	34,41	11,67	33,92	8,07	60,85	31,96

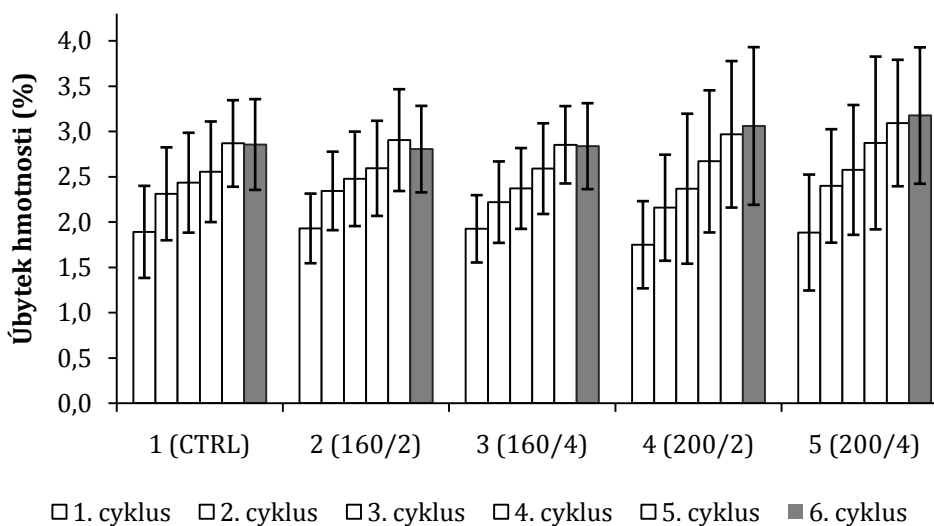


Obr. 33 Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty koeficientu účinnosti omezení sesychání v objemu

5.1.6 Ztráta hmotnosti vlivem vyluhování

Poměrově vyjádřené ztráty hmotnosti jednotlivých sad vzorků vzhledem k hodnotě hmotnosti na začátku zkoušky a jejich směrodatné odchylky jsou uvedeny v Tab. 12.

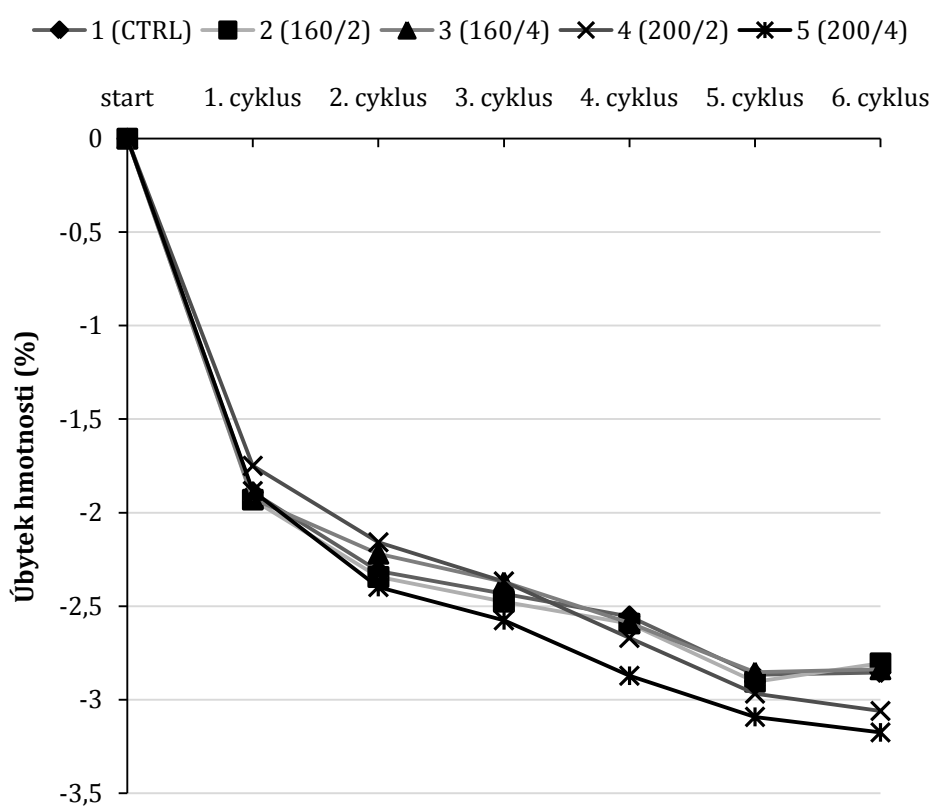
Úbytek hmotnosti dílčích cyklů pak názorně ilustruje obrázek grafu (Obr. 34) a jeho průběh je velmi dobře znázorněn na dalším Obr. 35.



Obr. 34 Souhrnný sloupcový graf průměrných hodnot úbytku hmotnosti v důsledku vyluhování v šesti cyklech máčení

Tab. 12 Průměrné hodnoty úbytku hmotnosti vlivem vyluhování po jednotlivých cyklech a jejich směrodatné odchylky

Sada	Průměrné hodnoty úbytku hmotnosti (%)					
	1. cyklus	2. cyklus	3. cyklus	4. cyklus	5. cyklus	6. cyklus
1	1,89 (0,5)	2,31 (0,5)	2,43 (0,6)	2,55 (0,6)	2,87 (0,5)	2,86 (0,5)
2	1,93 (0,4)	2,34 (0,4)	2,48 (0,5)	2,59 (0,5)	2,90 (0,6)	2,80 (0,5)
3	1,93 (0,4)	2,22 (0,5)	2,37 (0,5)	2,59 (0,5)	2,85 (0,4)	2,84 (0,5)
4	1,75 (0,5)	2,16 (0,6)	2,37 (0,8)	2,67 (0,8)	2,97 (0,8)	3,06 (0,9)
5	1,88 (0,6)	2,40 (0,6)	2,58 (0,7)	2,87 (1,0)	3,09 (0,7)	3,18 (0,8)



Obr. 35 Souhrnný spojnicový graf zobrazující reálný hodnotový vývoj průměrných úbytků hmotnosti vlivem vyluhování při šesti cyklech máčení a sušení

Téměř stejná hodnota vyluhování byla zaznamenána u sad s nejintenzivnějšími režimy modifikace, 3,06 % pro sadu 4 a 3,18 % pro sadu 5. Vzorky páté sady také mají nejvyšší průběžné hmotnostní úbytky. Nejmenších hmotnostních úbytků s podobnými hodnotami dosáhly zbylé tři sady zkoumaných vzorků. Konečné výsledky ale vykazují vysokou variabilitu, jejíž hodnoty jsou pro přehlednost uvedeny v Tab. 12.

Hodnoty souborů, až na sadu číslo 2 po prvním cyklu máčení, vykazují normální rozdělení dat. Po vícenásobné neparametrické komparizaci středních hodnot byla zjištěna statisticky nevýznamná odlišnost mezi hodnotami jednotlivých sad vzorků.

5.2 Výsledky testů mechanických vlastností materiálu

5.2.1 Pevnost a modul pružnosti ve statickém ohybu

Průměrné hodnoty hustot vzorků a jejich vlhkosti při zkoušce jsou uvedeny v tabulce (Tab. 13). Nízká vlhkost u vzorků z modifikovaného dřeva jistě mohla mít vliv na konečné výsledky tohoto testu.

Tab. 13 Průměrné hodnoty hustoty a vlhkosti vzorků v době měření

Sada	Průměrné hodnoty	
	Hustota	Vlhkost při zkoušce
	(kg/m ³)	(%)
1	345,80	9,81
2	350,80	8,85
3	355,20	8,68
4	340,27	6,17
5	335,40	5,41

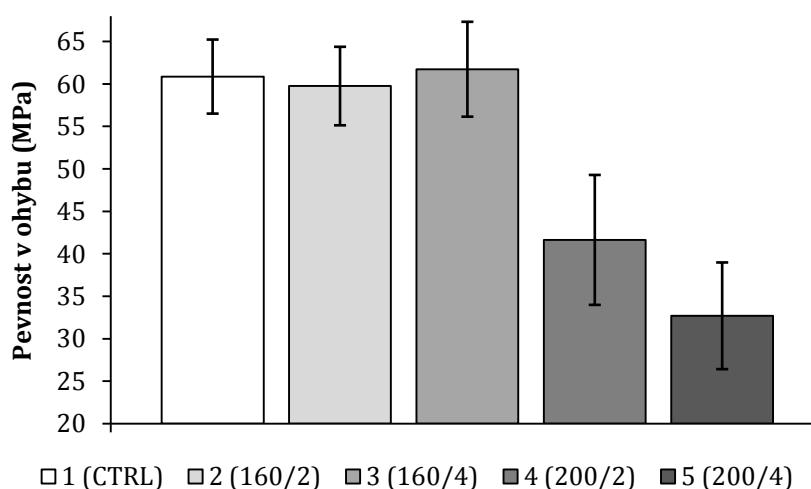
Další tabulka (Tab. 14) pak zobrazuje popisnou statistiku pevnosti ve statickém ohybu jednotlivých sad vzorků.

Vzhledem k výsledkům testu normality dat jednotlivých souborů lze prohlásit jejich rozdělení za normální. Významný statistický rozdíl byl zjištěn mezi skupinami vzorků číslo 4, 5 a 1, 2, 3.

Z výsledků měření je patrné, že i v tomto případě se projevil hmotnostní úbytek a vliv hustoty. Vzorky modifikované nejagresivnějším režimem vykazují až poloviční průměrnou pevnost, než vzorky kontrolní, a to 32,72 MPa. Kontrolní vzorky dosahují průměrné pevnosti 60,88 MPa. Tato hodnota je však velmi podobná průměrným hodnotám vzorků skupin 2 a 3, které byly modifikované teplotou 160 °C. Je zde tedy zaznamenán stejný trend jako v případě zmiňované hustoty. Více v diskuzi (6.2.1). Výsledky také ilustruje graf na Obr. 36.

Tab. 14 Popisná statistika meze pevnosti ve statickém ohybu testovaných vzorků

Sada	Popisná statistika meze pevnosti v ohybu					
	Průměr (MPa)	SMODCH (MPa)	VAR (%)	MIN (MPa)	MAX (MPa)	MEDIAN (MPa)
1	60,88	4,36	7,16	54,28	70,77	60,41
2	59,77	4,62	7,73	52,15	68,73	60,80
3	61,75	5,58	9,04	52,09	70,05	62,76
4	41,65	7,65	18,36	30,63	52,26	44,32
5	32,72	6,28	19,20	24,52	44,77	30,89



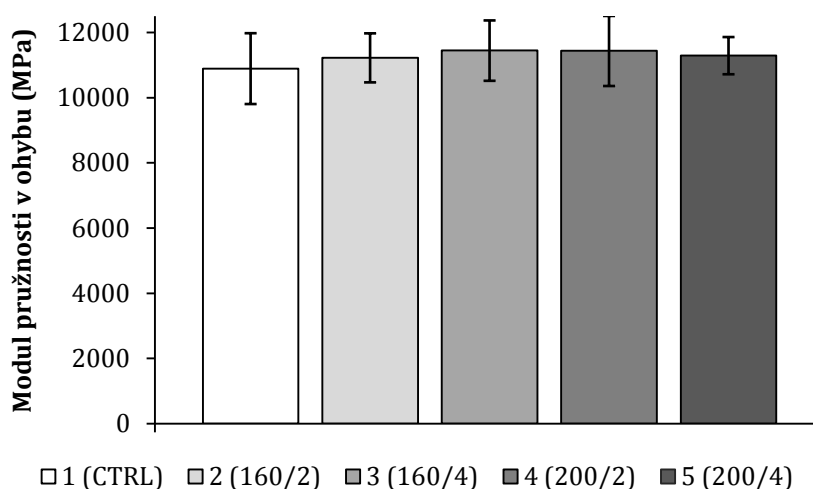
Obr. 36 Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty pevnosti vzorků ve statickém ohybu

Průměrné hodnoty modulu pružnosti ve statickém ohybu pak zobrazuje tabulka se statistickým vyhodnocením (Tab. 15). Dle výsledků testu nelze normalitu dat zamítnout ani v tomto případě a také nebyl shledán statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými soubory hodnot.

V porovnání s kontrolními nemodifikovanými vzorky dosahují ty modifikované poněkud vyšších hodnot, které se ale liší jen minimálně. Vzorky s nejintenzivnějším režimem modifikace (200 °C po 4 hodiny) dosáhli hodnoty 11288 MPa ale podobné hodnoty, 11221 MPa, vykazují také vzorky s nejslabším režimem modifikace (160 °C, 2 hodiny). Analogie průměrných hodnot modulu pružnosti je nejlépe patrná na obrázku grafu (Obr. 37).

Tab. 15 Popisná statistika modulu pružnosti ve statickém ohybu testovaných vzorků

sada	Popisná statistika modulu pružnosti v ohybu					
	Průměr (MPa)	SMODCH (MPa)	VAR (%)	MIN (MPa)	MAX (MPa)	MEDIAN (MPa)
1	10891	1085,9	10,0	8228	12930	10708
2	11221	751,9	6,7	9505	12743	11201
3	11442	925,7	8,1	9228	12818	11627
4	11432	1074,6	9,4	9852	13627	11307
5	11288	570,5	5,1	10290	12377	11382



Obr. 37 Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty modulu pružnosti vzorků ve statickém ohybu

5.2.2 Pevnost a modul pružnosti v tlaku podél vláken

Tab. 16 Průměrné hodnoty hustoty a vlhkosti vzorků v době měření

Sada	Průměrné hodnoty	
	Hustota (kg/m ³)	Vlhkost při zkoušce (%)
1	342,73	8,69
2	345,87	8,27
3	351,87	8,27
4	335,80	6,09
5	335,93	5,55

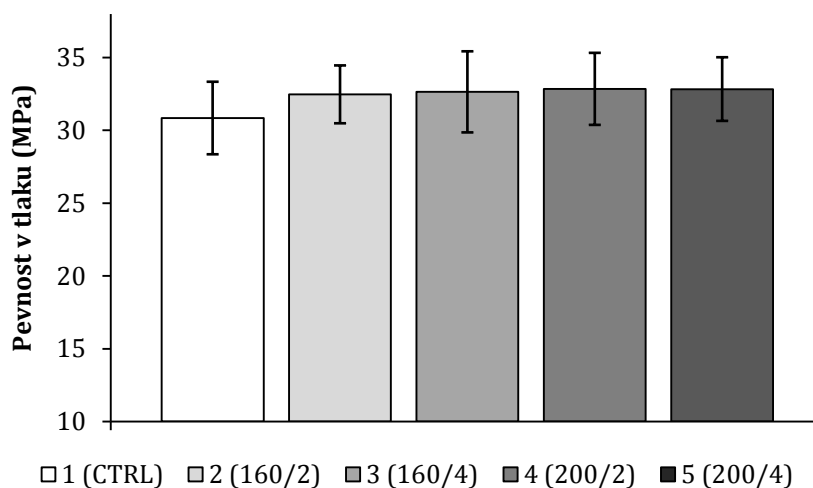
V Tab. 16 jsou uvedeny průměrné hodnoty hustot vzorků a jejich vlhkostí při zkoušce. Na výsledky zkoušky by také mohla mít vliv nižší vlhkost vzorků z tepelně modifikovaného materiálu.

Pro vyhodnocení výsledků byla použita popisná statistika a také vyjádření pomocí grafu. Test normality dat dílčích souborů neprokázal možnost jejího zamítnutí a neparametrickým vícenásobným porovnáním středních hodnot nebyla zjištěna statisticky významná odlišnost mezi hodnotami jednotlivých sad.

V Tab. 17 můžeme vidět průměrné hodnoty meze pevnosti v tlaku podél vláken. Rozdíl mezi kontrolními a modifikovanými vzorky je minimální a hodnoty modifikovaných vzorků jsou téměř stejné. Nejvyšších hodnot dosahují vzorky upravené teplotou 200 °C, a to 32,85 MPa v případě skupiny 4 a 32,83 MPa u skupiny 5. Podobnost hodnot přehledně zobrazuje graf na Obr. 38.

Tab. 17 Popisná statistika meze pevnosti v tlaku podél vláken testovaných vzorků

Sada	Popisná statistika meze pevnosti v tlaku					
	Průměr (MPa)	SMODCH (MPa)	VAR (%)	MIN (MPa)	MAX (MPa)	MEDIAN (MPa)
1	30,85	2,49	8,08	25,09	36,20	30,87
2	32,47	1,99	6,12	28,90	36,27	33,01
3	32,64	2,79	8,53	27,02	37,37	32,12
4	32,85	2,47	7,53	28,17	38,96	32,52
5	32,83	2,18	6,65	29,30	37,02	33,24



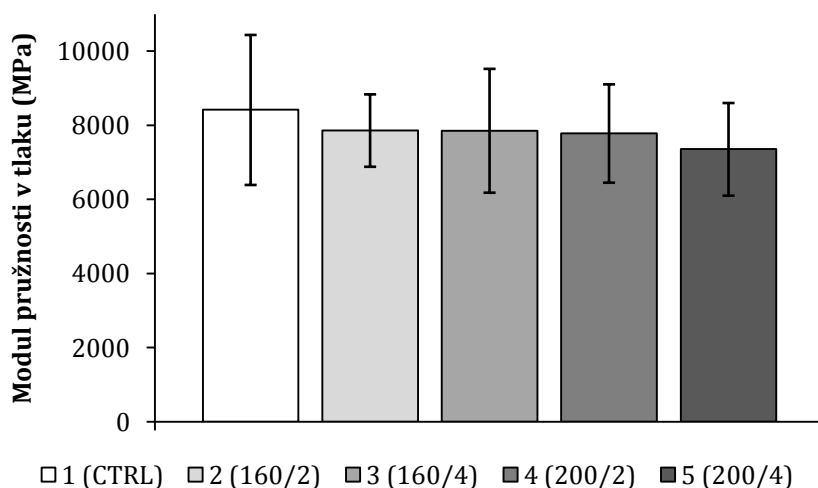
Obr. 38 Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty pevnosti vzorků v tlaku podél vláken

Tabulka (Tab. 18) pak zobrazuje průměrné hodnoty modulu pružnosti v tlaku podél vláken a jejich popisnou statistiku. Ani u této vlastnosti nebyl prokázán statisticky významný rozdíl mezi hodnotami. Normalitu dat lze zamítnout pouze u hodnot skupin 3 a 4.

Zde je trend opačný než v případě modulu pružnosti ve statickém ohybu. To znamená, že průměrné hodnoty modulu pružnosti v tlaku modifikovaného materiálu jsou nižší než průměrná hodnota vzorků kontrolních. Modifikovaný materiál dosahuje ve všech případech velmi podobných hodnot. Nejvyšší hodnoty tak dosahuje materiál kontrolní, 8419,2 MPa a hodnotu nejnižší, 7356,5 MPa, vykazují vzorky s nejintenzivnějším režimem modifikace. Obdoba hodnot je velmi dobře patrná z grafu na obrázku (Obr. 39).

Tab. 18 Popisná statistika modulu pružnosti v tlaku podél vláken testovaných vzorků

Sada	Popisná statistika modulu pružnosti v tlaku					
	Průměr (MPa)	SMODCH (MPa)	VAR (%)	MIN (MPa)	MAX (MPa)	MEDIAN (MPa)
1	8419,2	2023,6	24,0	5391,4	11901,9	8222,1
2	7863,0	976,9	12,4	5995,8	9608,2	8099,7
3	7857,3	1670,7	21,3	6074,1	11680,7	7048,8
4	7783,5	1326,7	17,0	6392,0	10657,2	7101,6
5	7356,8	1249,6	17,0	3815,2	9135,9	7478,1



Obr. 39 Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty modulu pružnosti vzorků v tlaku podél vláken

5.3 Výsledky odolnosti vůči dřevokazné houbě

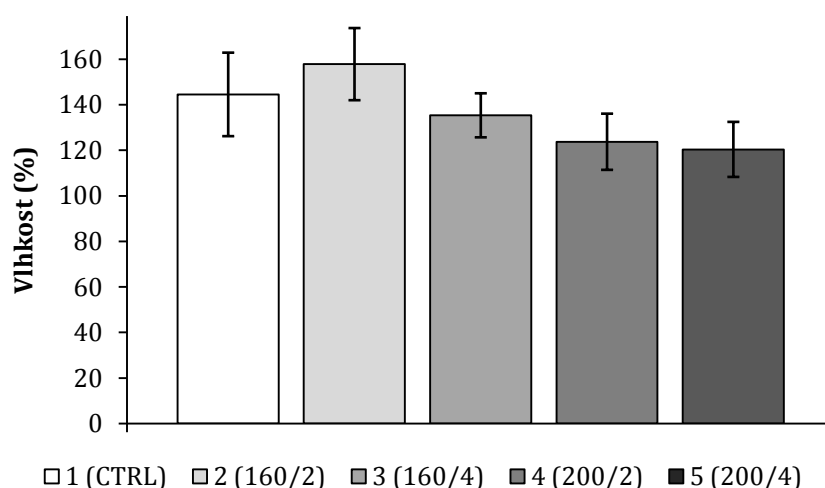
Při testu se projevila vysoká variabilita materiálu a biologického škůdce, dřevokazné houby.

Tabulka (Tab. 19) uvádí popisnou statistiku průměrných hodnot vlhkosti vzorků po vyjmutí z prostředí s mycéliem. Nenormální rozdělení vykazují hodnoty sad vzorků číslo 2 a kontrolních bukových. Ostatní sady vzorků mají hodnoty s nezamítnutelnou normalitou dat. Statisticky významný rozdíl středních hodnot po vícenásobném porovnání byl zjištěn pouze mezi souborem 2 a soubory 4 a 5.

Tab. 19 Popisná statistika vlhkosti vzorků v době vyjmutí z prostředí s mycéliem

Sada	Popisná statistika vlhkosti (%)					
	Průměr (%)	SMODCH (%)	VAR (%)	MIN (%)	MAX (%)	MEDIAN (%)
1	144,51	18,33	12,68	113,71	165,38	146,92
2	157,81	15,84	10,04	121,89	174,49	161,01
3	135,34	9,67	7,14	117,54	146,29	136,79
4	123,72	12,34	9,97	107,18	143,99	124,46
5	120,37	12,08	10,03	103,95	136,97	118,24

Nejnižší hodnoty vykazuje skupina vzorků číslo 5. Průměrná hodnota, 120,37 %, je ale velmi podobná průměrnému výsledku skupiny číslo 4, a to 123,72 %. Z obrázku grafu (Obr. 40) je velmi dobře patrná výchylka průměrné hodnoty vlhkosti skupiny 2, která je oproti průměrnému výsledku skupiny referenčních vzorků vyšší o 9,2 %. Tento jev bude blíže popsán v diskuzi (6.3).



Obr. 40 Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty vlhkosti vzorků při vyjmutí z agresivního prostředí s mycéliem

U kontrolní sady bukových vzorků byla zaznamenána průměrná vlhkost 47,81 % se směrodatnou odchylkou 11,84 % a variačním koeficientem 24,61 %.

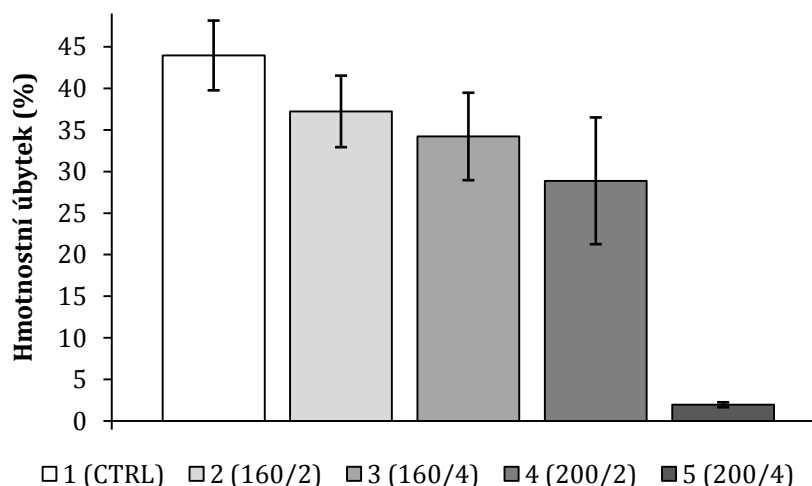
Průměrné hodnoty hmotnostních úbytků jsou uvedeny pomocí popisné statistiky v Tab. 20. Normalitu dat nelze, s přihlédnutím k výsledkům testu, zamítnout v žádné situaci a statisticky významně odlišné jsou hodnoty skupiny 5 vůči skupinám 1 a 5.

Tab. 20 Popisná statistika hmotnostního úbytku vzorků po působení houby

Sada	Popisná statistika hmotnostního úbytku (%)					
	Průměr (%)	SMODCH (%)	VAR (%)	MIN (%)	MAX (%)	MEDIAN (%)
1	43,94	4,19	9,54	36,20	49,83	43,58
2	37,22	4,30	11,55	32,97	46,45	35,89
3	34,21	5,25	15,36	27,36	44,84	32,10
4	28,88	7,62	26,38	14,55	36,15	29,74
5	1,96	0,29	15,01	1,59	2,36	1,80

Výsledky jsou přehledně shrnuty graficky na Obr. 41. Minimální hmotnostní úbytek vlivem působení dřevokazné houby byl vyhodnocen u skupiny s nejsilnějším režimem tepelné úpravy, kterou je pátá skupina vzorků s hodnotou 1,96 %. Skupina s nejbližší hodnotou 28,88 % je skupina číslo 4 a v podobném trendu jsou i výsledky ostatních skupin.

Kontrolní sada bukových vzorků dosáhla hmotnostního úbytku 31,73 % se směrodatnou odchylkou 7,74 % a variačním koeficientem 24,48 %.



Obr. 41 Souhrnný sloupcový graf s hodnotami průměrného hmotnostního úbytku vzorků po šesti týdnech působení dřevokazné houby

5.4 Přehled výsledků

Kompletní shrnutí výsledků ze všech testů zobrazuje Tab. 21 s průměrnými hodnotami naměřených dat.

Tab. 21 Průměrné hodnoty výsledků všech provedených experimentů; HÚ Δm_1 – hmotnostní úbytek vlivem modifikace, ρ_0 – hustota při 0% vlhkosti, RVD_{65%} – rovnovážná vlhkost dřeva v prostředí s vlhkostí 65 %, RVD_{99%} – rovnovážná vlhkost dřeva v prostředí s vlhkostí 99 %, αV_{\max} – maximální bobtnání v objemu při prvním cyklu máčení, $\dot{U}OB_{\max}$ – maximální účinnost omezení bobtnání v objemu při prvním cyklu máčení, βV – sesychání v objemu, $\dot{U}OS$ – účinnost omezení sesychání v objemu, HÚ $\Delta m_{2,\max}$ – maximální hmotnostní úbytek vlivem vyluhování po šestém cyklu máčení, HÚ $\Delta m_{3,\max}$ – maximální hmotnostní úbytek vlivem degradace dřevokazné houby, σ_{ohyb} – pevnost ve statickém ohybu, MP_{ohyb} – modul pružnosti ve statickém ohybu, σ_{tlak} – pevnost v tlaku podél vláken, MP_{tlak} – modul pružnosti v tlaku podél vláken

Průměrné hodnoty výsledků všech provedených experimentů	Vlastnost	Jedn.	Skupina				
			1 (CTRL)	2 (160/2)	3 (160/4)	4 (200/2)	5 (200/4)
	HÚ Δm_1	%	-	0,31	0,67	3,11	4,52
	ρ_0	kg/m ³	322,54	329,40	334,33	320,42	319,46
	RVD _{65%}	%	9,45	8,77	8,67	6,32	4,48
	RVD _{99%}	%	20,17	18,75	18,65	14,67	12,46
	αV_{\max}	%	10,73	10,98	10,81	7,19	6,46
	$\dot{U}OB_{\max}$	%	-	-2,32	-0,79	32,99	39,77
	βV	%	6,94	6,64	6,51	5,08	4,55
	$\dot{U}OS$	%	-	4,24	6,16	26,71	34,41
	HÚ $\Delta m_{2,\max}$	%	3,29	2,80	2,84	2,76	3,07
	HÚ $\Delta m_{3,\max}$	%	43,94	37,22	34,21	28,88	1,96
	σ_{ohyb}	MPa	60,88	59,77	61,75	41,65	32,72
	MP_{ohyb}	MPa	10891	11221	11442	11432	11288
	σ_{tlak}	MPa	30,85	32,47	32,64	32,85	32,83
	MP_{tlak}	MPa	8419,2	7863,0	7857,3	7783,5	7356,8

6 Diskuze

Následující kapitola je zaměřena na porovnání naměřených výsledků s dostupnou literaturou, interpretaci dat a celkové hodnocení možností využití dřeva tepelně modifikovaného hybridu topoluve výrobcích.

6.1 Fyzikální vlastnosti materiálu

6.1.1 Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace

Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace je obecně používaný parametr určující stupeň úpravy, popř. kvalitu upravovaného materiálu (Esteves a Pereira 2009) Podle znění patentu autorů Viitaniemi et al. (1997, 2006) je doporučený hmotnostní úbytek při tepelné úpravě 3 % pro zlepšení rozměrové stability dřeva a 5 % pro zvýšení odolnosti vůči biologickým činitelům. Při nižších hmotnostních úbytcích již není dosaženo požadovaného stupně úpravy. Hodnoty hmotnostních úbytků jsou rozdílné dle jednotlivých způsobů modifikace a druhu dřeva (Hill 2006).

Vzhledem k výsledkům uvedeným v kapitole 5.1.1 bylotěchto kritérií dosaženo pouze v případě skupin 4 a 5, tedy s nejvyššími stupni modifikace s hodnotami 3,11 a 4,52 %. Jsou až 15 krát vyšší než hodnoty skupin 2 a 3 (0,31 a 0,67 %), u kterých se vliv tepelné úpravy na hmotnost projevil minimálně. Z toho plyne, že režimy s teplotou 160 °C nedosáhnou dostatečné tepelné modifikace dřeva plantážově pěstovaného topolu.

Tuong a Li (2010) tepelně upravili dřevo hybridu akácie pěstované osm let na plantáži nedaleko města Hanoi ve Vietnamu. Při teplotě 210 °C a dobách úpravy 2, 4 a 6 hodin byly hmotnostní úbytky asi 3,8 %, 3,9 a 6 %, což jsou velmi podobné hodnoty s výše zmíněnými výsledky. Dřevo portugalského eukalyptu (*Eucalyptus globulus*) a borovice (*Pinus pinaster*) upravili teplotou 200 °C po dobu dvou a šesti hodin Esteves et al. (2006, 2007, 2007a, 2008) a hmotnostní úbytky byly 3,7 a 10,2 % a 2,1 a 3,5 %. Biziks et al. 2014 provedli tepelnou modifikaci různými režimy dřeva osiky (*Populus tremula*), olše (*Alnus incana*) a břízy (*Betula pendula*) vypěstovaných v Lotyšsku. V případě režimu s teplotou 160 °C po dobu jedné hodiny byl hmotnostní úbytek 0,8 %, který je podobný s výsledkem skupiny 3. Další HÚ pro stejný režim modifikace byly 1,9 a 0,6 %. Podobné hodnoty změny hmotnosti, 0,6 %, dosáhl tepelně modifikovaný buk (*Fagus orientalis* L.) z Turecka teplotou 160 °C po dobu 2 hodin (Bal 2015). I při jiných experimentech byly naměřeny úbytky hmotnosti. Například Metsä-Kortelainen et al. (2006) tepelně upravili dřevo smrku (*Picea abies*) a borovice (*Pinus sylvestris*) několika tříhodinovými režimy. Při teplotách 170 a 210 °C byly u smrkového a borového dřeva průměrné úbytky hmotností 2,7 a 6,75 %, 3,6 a 6,8 %. Dále Bal (2013) použil k úpravě dřevo tureckého cedru (*Cedrus libani*). Změna hmotnosti po 3 hodinách při teplotách 160, 200 a 220 °C byly 3,55, 6,81 a 12,39 %. U řecké jedle (*Abies Borissi-regis* Mattf.) s režimem úpravy 200 °C po dobu dvou a čtyřech hodin byly úbytky 0,76 a 2,78 % (Mitani a Barboutis 2014).

Výsledky uváděných autorů i výsledky předkládané práce jsou rozdílné v závislosti na použitém druhu dřeva, procesu, době úpravy, atd. Tyto aspekty jsou zmíněny v literárním přehledu kapitola 3.1.2. Výše uvedené experimenty dosáhli podobných výsledných hodnot, a proto lze předpokládat vhodné zvolení provedných procesu tepelné úpravy. Zřetel byl brán také na metodiku úpravy, která s ohledem na porovnání výsledků musí splňovat v praxi běžně používané a standardní postupy.

6.1.2 Hustota

Jak již bylo zmíněno v literárním přehledu (3.1.3.2), při působení vysoké teploty dochází ve dřevě ke změně anebo k odstranění chemických složek a tento jev má za následek snížení hustoty materiálu oproti původní hodnotě před úpravou (Rapp 2001; Militz 2002; Patzelt, Emsenhuber a Stingl 2003; Čermák 2013).

Výsledné hodnoty vzorků skupin podrobených výzkumu však výše uvedené tvrzení popírají. V porovnání s hustotou referenčních vzorků došlo k průkaznému poklesu vlivem degradace chemických složek dřeva pouze v případě skupin s nejsilnějšími režimy modifikace při 200 °C, a to jsou skupiny 4 a 5. Pozorovaná změna hustot však není zásadní, jedná se o hodnoty menší pouze o 2,12 a 3,08 kg/m³. U skupin s modifikovaným materiálem číslo 2 a 3 došlo však ke zvýšení hustoty, a to až o 6,86 a 11,79 kg/m³. Tento rozdíl mezi hustotou referenčních vzorků a hustotou zvýšenou je podstatně větší než rozdíl u vzorků s hustotou sníženou.

Nestandardní výsledky mohou být způsobeny několika faktory. Jedním může být lidský faktor, který se projevil ve špatném výběru vzorků na začátku přípravy materiálu, kdy by jedna nebo více sad mohlo obsahovat několik kusů z jednoho výřezu s vysokou hustotou. Variabilita vlastností dřeva plantážově pěstovaných dřevin je totiž velmi vysoká. Závisí na mnoha faktorech, například na stanovišti v plantáži, hustotě sadby, místním podloží, růstových podmínkách, atd. (Huda et al. 2014). Tato možnost je ale velmi nepravděpodobná vzhledem k složitému výběru a kombinování velkého množství výřezů vstupního materiálu (viz kapitola 4.2). Dalším faktorem může být chyba vzniklá při měření vzorků. Tuto možnost ale můžeme vyloučit vzhledem k velmi podobnému vývoji hustot získaných při jednotlivých experimentálních měření.

Hypoteticky lze říci, že při působení určitých teplot, které jsou pod hranicí významější degradace chemických složek dřeva, dochází k sesychání a borcení (kolapsu) struktury a tím k jejímu samovolnému „zhuštění“. Zkoumaný materiál, dřevo plantážově pěstovaného topolu, je velmi pórovité (Balatinecz et al. 2014) a díky tomu obsahuje velmi mnoho místa, kam se mohou buňky dřeva smrstit při vysychání a kolapsu buněk způsobeném tepelnou modifikací. Zhuštění struktury je pravděpodobně minimální avšak se zaznamenanými rozdíly oproti referenčnímu materiálu. Pro ověření této hypotézy by bylo nutné provést chemický rozbor a případně i analýzu změn mikroskopické struktury. Vzhledem k tomu, že zkušební tělíska byla vyrobena až z tepelně upravených hrubých přířezů blíže nespecifikovaných rozměrů, nelze proto jednoznačně stanovit změnu objemu vlivem sesychání a tím podpořit tuto hypotézu. Je však možné, že díky jevu sesychání, kolapsu

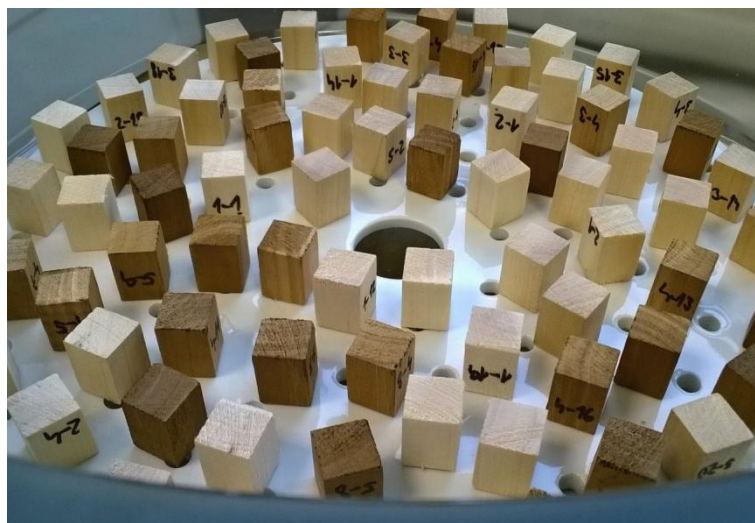
buněk a následně „zhuštění“ struktury mohou mít konečná zkušební tělíska vyšší hustotu, než vzorky vyrobené z referenčního materiálu. Podobný mechanismus změn struktury dřeva popisují Vobolis a Albrektas (2014) v publikaci zkoumající vlastnosti tepelně upraveného dřeva břízy (*Betula pendula*). Při teplotách od 120 do 210 °C uvádí u vzorků průměrnou hodnotu poklesu objemu 4,7 %. Tímto chováním může být výše zmíněná hypotéza podpořena. Další anomálií vztahenou k indexu omezení bobtnání tepelně upraveného dřeva objevili Wang et al. (2010). Výklad jejich hypotézy je uveden ve vztahné kapitole 6.1.4.

Průměrnou hodnotu hustoty referenčních vzorků kontrolní sady (322,54 kg/m³) můžeme porovnat s hodnotami uvedenými ve vybrané literatuře. Odlišnosti mohou být způsobené rozdílností v místě pěstování a vlastními růstovými podmínkami. Hybridy topolů (klony *P. deltoides*, *P. nigra* a *P. maximowitzi*) pěstované na plantážích v Kanadě mezi městy Québec a Montréal měli hustotu dřeva pohybující se v rozmezí 327 až 380 kg/m³ (Huda et al. 2014). Klony topolů *P. trichocarpa* a *P. deltoides* z plantáží v Belgii dosahovali hustoty dřeva 361, 372 a 402 kg/m³ (De Boever et al. 2007). Wu et al. (2010) uvádějí hustotu dřeva topolu (*P. euramericana*) pěstovaného v Číně u Pekingu 370 kg/m³, stejný druh topolu pěstovaný v Íránu měl průměrnou hustotu dřeva 343,46 kg/m³ (Kord et al. 2010), Kutnar et al. (2008) publikovali hustotu 330 kg/m³ pro klon topolů *P. deltoides* a *P. trichocarpa*. Další hustoty hybridu topolů (*P. eramericana*) a nativních topolů (*P. deltoides*, *P. tremuloides*, *P. grandidetata*) publikovali Koubaa et al. (1998a). Jejich dřevo mělo hustoty 350, 352, 374 a 390 kg/m³.

6.1.3 Rovnovážná vlhkost

Vývoj rovnovážné vlhkosti u zkoumaného materiálu odpovídá myšlenkám uvedeným v literárním přehledu (kap. 3.1.3.1) při obou zkoumaných podmínkách.

V případě podmínek prostředí s 65% relativní vlhkostí vzduchu a teplotě 20 °C byl u vzorků referenční sady 1 a sady s nejvyšším zvoleným stupněm modifikace číslo 5 po týdnu expozice zaznamenán rozdíl vlhkosti o 52,6 %. Při stejných podmínkách prostředí a době byl pokles vlhkosti mezi sadou 1 a sadou 3, respektive 2, mnohem nižší a dosáhl hodnoty 8,25 %. Výsledky měření rovnovážné vlhkosti materiálu v prostředí s 99% vlhkostí vzduchu při 20°C již tak velké rozdíly mezi sadami vzorků nepřináší. Pokles vlhkosti o 38,22 % byl zaznamenán mezi sadami číslo 1 a 5, v případě sad 1 a 3, respektive 2, byl pokles 7,53 %. Z tohoto chování plyne, že při delším vystavení vyšší relativní vdušné vlhkosti dochází ke snižování rozdílů rovnovážné vlhkosti mezi modifikovaným a nemodifikovaným materiálem. Pozorovatelné jsou i rozdíly mezi dobami úpravy. Bez ohledu na expoziční prostředí činil rozdíl mezi vlhkostmi vzorků čtvrté a páté skupiny zhruba 2 %, zatím co u skupin 2 a 3 byl tento rozdíl pouze asi 0,1 %. S přihlédnutím k variabilitě výsledků vzorků s režimem tepelné úpravy při 160°C je tento rozdíl zanedbatelný.



Obr. 42 Fotografie z testu rovnovážné vlhkosti dřeva a sesychání v prostředí s 99% vlhkostí vzduchu; vzorky umístěné na perforované porcelánové podložce ve skleněném eksikátoru s destilovanou vodou (foto autor)

Bak a Nemeth (2012) provedli úpravu dřeva topolu (tzv. Pannónia) OHT procesem při stejných režimech úpravy. Rozdílnost procesu způsobila pokles rovnovážné vlhkosti dřeva v prostředí s 65% vlhkostí a teplotě 20 °C asi o 2 % ale stejně tak, jako v případě sad 2 a 3, se tyto hodnoty liší minimálně (6,58 a 6,31 %). Hodnoty RVD dřeva modifikovaného při 200 °C po 2 hodiny jsou téměř identické (6,32 a 6,27 %), pro režim skupiny 5 je však výsledek procesu OHT horší (4,48 ku 5,29 %). Rovnovážná vlhkost referenčních vzorků je skoro stejná, a to 9,45 a 9,67 %. Hodnotu 10,5 % u dřeva portugalského eukalyptu (*Eucalyptus globulus*) publikovali Esteves et al. (2006, 2007, 2007a, 2008). Jejich tepelně upravený materiál (200 °C, 2 hod.) vykazoval RVD mezi 4 až 4,5%. Čermák et al. (2013a) naměřili u topolu (*Populus alba*) upraveného teplotou 200 °C hodnotu 4,7 %, u buku 4,9 % a u smrku 6,6 %. Bal (2013) po 3 hodiny tepelně modifikoval dřevo cedru (*Cedrus libani*) z Turecka. Po působení teplot 160, 200 a 220 °C byly rovnovážné vlhkosti jádrového dřeva 11,3, 8,3 a 6,7 % což byl pokles až o 35,6 % oproti referenčním vzorkům. Bal (2015) provedl další experiment s tepelně upraveným dřevem tureckého buku (*Fagus orientalis* L.). Pokles mezi referenčními vzorky a vzorky upravenými teplotou 160 °C po 2 hodiny byl jen 0,1 %, vyšší hodnoty poklesu rovnovážné vlhkosti dřeva byly zaznamenány v případě dvouhodinových režimů se 190 a 220 °C, a to 8,2 a 34 %. Průměrná hodnota RVD u tepelně modifikovaného dřeva douglasky (*Pseudotsuga menziesii*) při režimech 160/2, 160/4, 200/2 a 200/4 (teplota v °C/čas v hodinách) byla 15, 14,8, 11 a 10 %. V tomto experimentu byl největší pokles oproti základním vzorkům s hodnotou 5,34 % až o 42,63 % v případě skupiny s režimem 220 °C po 4 hodinách (Li et al. 2011c). Tepelně upravené dřevo jedle z Řecka (*Abies Borissi-regis* Mattf) režimy s 200°C po dobu dvou a čtyřech hodin měli RVD 5,64 a 5,13 %. Zlepšení v porovnání s referenčními

vzorky s hodnotou 11,03 % je až 53,49 % (Mitani a Barboutis 2014). Pokles až 50 % uvádí u vzorků dřeva borovice (*Pinus sylvestris*) upravených teplotou 220 °C po 3 hodiny Anon. (2003).

Tyto hodnoty mohou být ovlivněny dobou expozice prostředí a velikostí vzorků. Je zde tedy prostor pro další analýzu a optimalizaci v dané oblasti.

6.1.4 Bobtnání a účinnost omezení bobtnání

Konečné hodnoty experimentu bobtnání v objemu spolu s indexem účinnosti omezení bobtnání vykazují vysokou variabilitu, a proto lze říci, že se během jednotlivých cyklů neměnily a rozdíly mezi sadami jsou zanedbatelné. Výsledky u skupin 2 a 3 ale popírají informace uvedené v literárním přehledu (3.1.3.1) o tom, že tepelně upravené dřevo má nižší sorpční vlastnosti a tedy méně bobtná. Vývoj je u těchto skupin vzorků právě opačný a to i přes to, že trend průměrných hodnot vlhkosti odpovídá výše zmíněnému faktu. Hypotéza příčiny tohoto jevu je rozebrána v kapitole 6.1.2. V případě skupin 4 a 5 je už trend dle předpokladů, avšak rozdíl mezi průměrnými hodnotami bobtnání těchto skupin je malý.

Po prvním cyklu máčení byla průměrná hodnota bobtnání v objemu u referenčních vzorků 10,73 %. Nejvyšší hodnota bobtnání po prvním cyklu máčení byla u skupiny 2. Činila 10,98 % a byla o 2,33 % vyšší. Tato hodnota u sady 3 sice klesá, ale stále je vyšší než hodnota referenční, zhruba o 0,75 %. 7,19 a 6,46 % jsou průměrné hodnoty bobtnání v objemu po prvním cyklu pro sady 4 a 5. Celkový maximální pokles bobtnání je tedy 39,79 %. Po šestém cyklu máčení je trend mezi sadami podobný. Maximální hodnota bobtnání zůstala ve druhé sadě, 10,35 % a je jen o 5,74 % menší než hodnota po prvním cyklu. Velmi podobnou hodnotu (5,57 %) má i rozdíl mezi hodnotami prvního a šestého cyklu u skupiny 5. Z toho vyplývá, že se průměrné hodnoty bobtnání v objemu mírně snížily.

Index účinnosti omezení bobtnání přinesl nestandardní výsledky pro skupiny 2 a 3. Z výše uvedených výsledku bobtnání v objemu plyne, že index účinnosti omezení bobtnání musí být pro tyto skupiny záporný. Toto tvrzení plně platí u skupiny 2, protože průměrné hodnoty ze všech šesti cyklů jsou záporné. U skupiny 3 se v průběhu experimentu vyskytly i hodnoty kladné. Vzhledem k již zmíněné vysoké variabilitě hodnot naměřených během tohoto testu je možné výsledky prohlásit za statisticky nevýznamné. Určité vysvětlení tohoto jevu může poskytnout hypotéza probíraná v kapitole 6.1.2. Podobný problém řešili Wang et al. (2010) ve svém pokusu analyzujícím nejvhodnější proces tepelné modifikace pro plantážově pěstovaný hybrid topolu v Číně. Po režimu úpravy 180 °C a 1,5 hodiny vykazovaly vzorky průměrnou hodnotu účinnosti omezení bobtnání -2,5 %, a to je velmi blízká hodnota průměrnému výsledku u druhé skupiny po prvním cyklu máčení, která byla -2,32 %. Autoři výše uvedené publikace použili k vysvětlení této anomálie jev zvaný vitrifikace vláken dřeva, tzn. zeskelnatění struktury dřeva vlivem působení teploty v krátkém čase. V tomto případě byla pravděpodobná vitrifikace minimální ale stačila pro viditelnou odchylku od běžných hodnot. Pro konečné průměrné hodnoty ÚOB skupin 4 a 5 ale tato anomálie neplatí. Po prvním cyklu máčení dosáhly hodnot 32,99 a 39,77 %. Pokles v hodnotách mezi prvním a šestým cyklem se

pohybuje v rozmezí 0,72 až 1,69 %. Kvůli variabilitě naměřených dat je tento rozdíl zanedbatelný.

Rozměrovými změnami tepelně modifikovaného dřeva, zejména bobtnáním, se již zabývalo mnoho autorů. Například Čermák et al. (2015) tepelně upravili dřevo topolu (*Populus alba* L.), buku (*Fagus sylvatica* L.) a smrku (*Picea abies* L. Kaarst.). Po třech hodinách a 200 °C bylo bobtnání v objemu po prvním cyklu 7,2, 12 a 11,5 %. V cyklu šestém pak byly hodnoty vyšší, a to 7,2, 13,4 a 12,2 %. Koeficient účinnosti omezení bobtnání se u každé skupiny v průběhu cyklů máčení a sušení postupně snižoval. Nejvyšší hodnota byla zjištěna u topolu (200 °C a 3 hodiny), po prvním cyklu a činila 54,7 %. Po šestém cyklu tato hodnota klesla asi o 20 %. Buk pak vykazoval vyšší hodnoty ÚOB než smrk. Čermák et al. (2015a) provedli podobný test se dřevem borovice (*Pinus sylvestris* L.). Opět použili režim tepelné úpravy s teplotou 200 °C a dobou 3 hodiny. Hodnota bobtnání v objemu po prvním cyklu byla asi 10 % a po cyklu šestém vzrostla na 11 %. Oproti výsledku u referenční skupiny vzorků to je pokles o 38,88 %. Index účinnosti omezení bobtnání se během cyklů snižoval ale vzhledem k vysoké variabilitě dat je tento vývoj statisticky nevýznamný. Další podobný test provedli Biziks et al. (2014) se dřevem osiky (*P. tremula*), břízy (*B. pendula*) a olše (*A. incana*). Při režimu 160 °C a 1 hodiny bylo bobtnání v objemu po prvním cyklu 9, 9,5 a 6,8 %. Po cyklu pátém byly hodnoty vyšší, a to průměrně o 5,43%. Nejvyšší hodnoty ÚOB (58 %) dosáhlo upravené dřevo olše po prvním cyklu. V pátém cyklu hodnoty klesly zhruba o 26,33 %. Dřevo íránského topolu (*P. euramericana*) vykazovalo průměrnou hodnotu bobtnání v objemu asi 8,52 % (Kord et al. 2010). Dřevo tureckého cedru (*Cedrus libani*) upravil Bal (2013) po dobu dvou hodin, 160 a 200 °C a získal hodnoty bobtnání v objemu 9,53 a 6,21 %. Dále modifikoval dřevo tureckého buku (*Fagus orientalis* L.) při teplotě 160 °C po 2 hodiny a získal hodnotu bobtnání 16,1 %, která je oproti referenční hodnotě nižší o 8,5 % (Bal 2015). Esteves et al. (2007, 2007a) provedli experiment s tepelně upraveným portugalským dřevem borovice (*Pinus pinaster*) a eukalyptu (*Eucalyptus globulus*). Hodnoty ÚOB po 200 °C a 2 hodinách byly 35,9 a 66,8 %. Bobtnání v objemu pro nemodifikované dřevo eukalyptu bylo 9,2 %. Stejný druh eukalyptu použil k úpravě teplotou 180 °C po tři hodiny Santos (2000) a získal hodnotu účinnosti omezení bobtnání 24 %. Dřevo douglasky (*Pseudotsuga menziesii*) upravené teplotami 160 a 200 °C při čase 2 a 4 hodiny nabobtnalo v objemu asi 14,5 % pro 160/2/4, 8 % pro 200/2 a 7 % pro 200/4 (Li et al. 2011c). Jedle (*Cunninghamia lanceolata*) a její dřevo upravené teplotou 200 °C po dobu 2 a 4 hodiny má průměrnou ÚOB 24 a 33 % (Cao et al. 2012). Balatinect et al. (2014) uvádí hodnoty bobtnání v objemu dřeva různých druhů topolů jiných dřevin určených pro pěstování na plantážích. Například dřevo *P. deltoides* a *P. trichocarpa* s hustotou 370 a 310 kg/m³ nabobtná v objemu o 13,9 a 12,4 %.

Výčet dalších publikovaných výsledků rozměrové stability tepelně modifikovaného dřeva by byl nad rámec této práce. Hodnoty bývají omezené expozičním prostředím, chybou měření a variabilitou vstupního materiálu.

6.1.5 Sesychání a účinnost omezení sesychání

Vývoj hodnot sesychání zkoumaného materiálu se drží podobného trendu, jako vykazují hodnoty rovnovážné vlhkosti.

Největší rozdíl u režimů modifikací je mezi skupinou 4 a 5, kdy hodnota sesychání v objemu klesla u nejagresivnějšího režimu úpravy o 10,43 % a oproti referenčnímu materiálu s hodnotou sesychání 6,94% až o 34,44 %. Rozdíly mezi sadami 2 a 3 opět nejsou výrazné a jedná se o pokles asi 0,1 %, v porovnání se skupinou referenčních vzorků o 6,2 %. Účinnost omezení sesychání vykazuje podobný trend. Nejvyšší průměrnou účinnost způsobil režim úpravy u páté skupiny vzorků a to 34,41 %. Druhý modifikační režim s teplotou 200 °C dosáhl průměrné hodnoty účinnosti omezení bobtnání 26,71 %.

Kord et al. (2010) publikovali jako průměrnou hodnotu sesychání v objemu pro dřevo topolu (*Populus euramericana*) 8,52 %. Hybrid topolu (*Populus deltoides*) vypěstovaného v Číně tepelně upravili ve vakuu Gao et al. (2016). Po dvouhodinovém působení prostředí se 140 a 200°C bylo sesychání v objemu 10,99 a 8,87 % což je zlepšení o 32,85 % oproti referenčnímu materiálu. Nemodifikované dřevo hybridu topolů (*P. deltoides* a *P. nigra*) z oblasti jižní Kanady podrobili výzkumu sesychání Koubaa et al. (1998a). Dřevo výsledného hybridu *P. euramericana* mělo průměrnou hodnotu bobtnání v objemu 12,8 %. Pro porovnání bobtnání v objemu u nativních druhů topolů *P. deltoides* a *P. tremuloides* je 14,1 a 11,5 %. Experiment, který zjišťoval koeficient účinnosti omezení sesychání v objemu vlivem tepelné modifikace provedli Cao et al. (2012). Zjistili, že upravené dřevo jedle (*Cunninghamia lanceolata*) teplotou 170 °C po 2 hodiny vykazuje průměrný index účinnosti omezení sesychání 6 %. Po dalších režimech úpravy (170 °C/4 h, 200 °C/2 h, 200 °C/4 h) byla ÚOS 12, 29 a 37 %.

Dle výsledků je sesychání výrazně omezeno a tato změna u modifikovaného dřeva teplem je popsána v kapitole 3.1.3.1 literárního přehledu. Konečné hodnoty tohoto testu mohou být ovlivněny dobou působení podmínek prostředí (1 týden) a velikostí vzorků.

6.1.6 Ztráta hmotnosti vlivem vyluhování

Jak je zřejmé z kapitoly 5.1.6, tak se při vyluhování projevila velká variabilita vstupního materiálu. Z výsledných průměrných hodnot ale plyne, že hmotnostní úbytek vlivem vyluhování po jednotlivých cyklech roste což dokládá i kapitola 3.1.3.1.

Nejvyšší hodnoty hmotnostních úbytků u všech sad vzorků byly zaznamenány po prvním cyklu máčení a sušení. Lišily se minimálně a pohybovaly se v rozmezí od 1,75 % (sada 4) do 1,93 % (shodně sady 2 a 3). Po šestém cyklu experimentu bylo celkové vyluhování největší v případě sad s druhým dle teploty specifikovatelným režimem (200 °C) a bylo o 11,19 % vyšší než celkové vyluhování u první sady s referenčními vzorky. První tři sady zkoumaných vzorků (1, 2 a 3) vyluhovali skoro stejně.

Podobný test se stejnými podmínkami máčení a sušení provedli Čermák et al. (2015). U tepelně upraveného dřeva při 180 a 200 °C po 3 hodiny naměřili po šestém cyklu máčení na vysušených vzorcích buku (*Fagus sylvatica*), topolu (*Populus alba*) a smrku (*Picea abies* Kaarst.) hodnoty ztráty hmotnosti 1,5 %, 2 % a od 0,5 do 0,7 %. Nejvyšší úbytky byly v případě dřeva listnatých dřevin u skupiny s nižším stupněm tepelné úpravy. Očekáváním však bylo, že nejvyšší úbytky budou právě u druhého stupně tepelné úpravy s teplotou 200 °C. V případě dřeva jehličnaté dřeviny byl vývoj dle předpokladů. Takového výsledku dosáhli Čermák et al. (2015a) v dalším experimentu s tepelně upraveným (180 a 200 °C, 3 hodiny) dřevem borovice (*Pinus sylvestris* L.). Pro jednotlivé režimy úpravy byly hmotnostní úbytky 0,3 a 0,37 %.

K tomuto tématu je bohužel velmi málo dostupné literatury. Několik autorů se již zabývalo cyklickým máčením a sušením různých materiálů na bázi dřeva ale bez výzkumu vyluhování (Rowell a Ellis 1978; Rowell et al. 2002; Esteban et al. 2005; Clauder a Pfriem 2013; Laine et al. 2013; Laine et al. 2013a; Biziks et al. 2014). I zde je tedy prostor pro budoucí výzkum této vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva.



Obr. 43 Fotografie z testu bobtnání a ztráty hmotnosti vlivem vyluhování při namočení vzorků v destilované vodě (foto autor)

6.2 Mechanické vlastnosti materiálu

6.2.1 Pevnost a modul pružnosti ve statickém ohybu

Na konečné výsledky pevnosti v ohybu se spíše než avizovaná vlhkost projevilo zvýšení hustoty u sad vzorků 2 a 3. I zde se tento jev prokázal podobně jako v případě bobtnání. Hypotetické vysvětlení je uvedeno v kapitole 6.1.2. Kromě zmíněných sad 2 a 3, jejichž hodnoty vykazovaly odchylku oproti literárnímu přehledu (kap. 3.1.3.2), byly výsledky skupin 4 a 5 dle uvedených předpokladů.

První tři sady vzorků měly vysokou variabilitu hodnot, a proto lze říci, že konečné výsledky byly stejné, tzn. referenční a dvě skupiny tepelně upraveného materiálu. Průměrná hodnota pevnosti v ohybu sady 3 je dokonce o 1,43 % vyšší než hodnota referenčních vzorků (60,88 MPa). Největší průměrný pokles pevnosti je u vzorků s nejintenzivnějším režimem úpravy a to zhruba na polovinu hodnoty vzorků sady 1. V případě modulu pružnosti byly naměřeny podobné hodnoty u všech sad vzorků a vzhledem k jejich variabilitě je možné minimální rozdíly zanedbat. Hodnota skupiny kontrolních vzorků byla nejnižší ze všech sad (10,89 GPa). Sady modifikovaného materiálu dosáhly shodně na průměrnou hodnotu modulu pružnosti v ohybu přes 11,2 GPa.

Čermák et al. (2013a) provedli test pevnosti v ohybu se vzorky několika dřevin (*Picea abies*, *Populus alba* a *Fagus sylvatica*) upravených procesy s teplotami 180 a 200 °C. Pro smrk byly hodnoty 58 a 47 MPa, pro buk 124 a 111 MPa a pro topol 50 a 42 MPa. Pokles hodnot oproti referenčním vzorkům byl zhruba 20 a 30 %. Statické moduly pružnosti u buku (16,3 GPa) a smrku (10,1 GPa) poklesly asi o 2 až 13 %, u topolu tato hodnota mírně stoupla, a to o 5 % (z ref. 8,1 na 8,4 GPa). Dřevo eukalyptu (*Eucalyptus globulus*) tepelně upravil Santos (2000) teplotou 180°C po dobu 3 hodiny. Modul pružnosti u jeho materiálu oproti referenčním vzorkům vzrostl o 73 % na hodnotu 27 646 MPa. Gao et al. (2016) použili k úpravě dřeva čínského topolu (*P. deltoides*) teploty 160 a 200 °C po dobu dvou hodin. Výsledné hodnoty pevnosti v ohybu byly 59,8 a 46,9 MPa. V porovnání s nemodifikovaným dřevem došlo ke 34% snížení pevnosti. Moduly pružnosti v ohybu pak byly 8440 a 7623 MPa. Oproti referenčnímu materiálu došlo ke snížení o 13,5 %. Hybrid čínského topolu upravený teplotou 200 °C po dobu 3,5 hodiny měl zhoršenou pevnost v ohybu o 18 % a modul pružnosti o 10 % (Wang et al. 2015). Pevnost v ohybu neupraveného dřeva kanadských hybridů topolů zkoumali Ding et al. (2013). Dřevo klonů *P. nigra* a *P. maximowitzii*, *P. deltoides* a *P. nigra*, *P. maximowitzii* a *P. deltoides* dosáhlo hodnot ohybové pevnosti 46,5, 47,6 a 39,3 MPa a hodnot modulu pružnosti 4,96, 3,73 a 4,27 GPa. Dále dřevo impregnovali MMA (metyl methakrylát) a po polymerizaci teplem zvýšili jeho pevnost a modul pružnosti. Například u klonu *P. nigra* a *P. maximowitzii* došlo ke zvýšení hodnoty pevnosti na 55,2 MPa a modulu pružnosti až na 5,25 GPa. De Boever et al. (2007) naměřili u dřeva klonu topolu *P. trichocarpa* a *P. deltoides* pevnost 68,7 MPa a MP 7,42 GPa. Yildiz et al (2005) dosáhli u dřeva klonu topolu *P. euramericana* pevnosti a modulu pružnosti 32,6 MPa a 3,86 GPa. Bendsten et al. (1981) zjistili u dřeva hybridu topolů *P. deltoides* a *P. nigra* pevnost a modul pružnosti 33,6 MPa

a 5,38 GPa. Pokles pevnosti u dřeva břízy (*Betula pendula*) upravené režimem 200 °C/3 hodiny je až o 43 %, jak uvádí Johansson a Morén (2006). O 50 % se sníží pevnost v případě eukalyptu (*Eucalyptus globulus*) upraveného teplotou 200 °C a desetihodinovým procesem (Esteves et al. 2006). Esteves et al. (2007a) provedli se dřevem eukalyptu další testy. Při dvouhodinovém režimu s teplotami 180 a 200 °C byla ohybová pevnost snížena o 11 a 34 %. Modul pružnosti byl však u druhého režimu nepatrně zvýšen o 1 %. Dřevo turecké borovice (*Pinus sylvestris*) tepelně upravili Korkut et al. (2008) teplotou 180 °C po dvě hodiny. Pevnost a modul pružnosti klesli oproti referenčním vzorkům o 14,85 a 29,35 % na hodnoty 117,5 a 1040,49 MPa.

Zmíněné výsledky experimentů se přibližně shodují s konečnými hodnotami testů provedených v rámci této práce. Tyto hodnoty mohou být ovlivněny dobou expozice prostředí a charakterem materiálu vzorků. Vzhledem k nepředpokládanému vývoji u skupin 2 a 3 je zde prostor pro následný výzkum a další bádání.



Obr. 44 Fotografie situace při měření pevnosti ve statickém tříbodém ohybu na univerzálním zkušebním stroji ZwickZ050 s extenzometrem pro snímání deformací (foto autor)

6.2.2 Pevnost a modul pružnosti v tlaku podél vláken

Při testu pevnosti v tlaku se výšená hustota ani rozdílná vlhkost vzorků neprojeví. Vývoj hodnot odpovídá informacím uvedeným v literárním přehledu (kap. 3.1.3.2).

Nejnižší výslednou hodnotu pevnosti v tlaku vykazují vzorky referenční, a to 30,85 MPa. Skupiny upraveného dřeva mají hodnoty takřka stejné (variabilita hodnot), liší se jen v desetinách MPa a dosahují přes 32,4 MPa. Nejvyšší průměrnou hodnotu má materiál sady 5. Je vyšší o 6,42 % oproti hodnotě referenčního materiálu. Mírný sestupný trend je u průměrných hodnot modulu pružnosti v tlaku podél vláken. Největší rozdíl je mezi skupinami 1 a 5. Jedná se zhruba o 13%

pokles z 8419,2 MPa na 7356,8 MPa. Sady vzorků 2, 3 a 4 vykazují velmi podobnou hodnotu MP kolem 7,8 GPa.

Pevnost v tlaku podél vláken měřili Gao et al. (2016) na tepelně upraveném (160 a 200 °C, 2 hodiny) dřevě čínského topolu (*P. deltoides*). Naměřené hodnoty byly 18,03 a 17,34 MPa. Pokles oproti referenčnímu materiálu byl 18,74 %. Pevnost v tlaku podél vláken nemodifikovaného dřeva kanadských hybridů topolů zkoumali Ding et al. (2013). Dřevo klonů *P. nigra* a *P. maximowitzii*, *P. deltoides* a *P. nigra*, *P. maximowitzii* a *P. deltoides* dosáhlo hodnot pevnosti v tlaku 28,4, 26,9 a 25 MPa a hodnot modulu pružnosti 3,7, 3,22 a 3 GPa. Dále dřevo impregnovali MMA (metyl methakrylát) a tím zvýšili jeho pevnost a MP. Například u hybridu *P. nigra* a *P. maximowitzii* došlo ke zvýšení pevnosti až na 32,3 MPa a modulu pružnosti na 3,74 GPa. Matyás a Peszlen (1997) naměřili u dřeva klonu topolu *P. euramericana*(Koltay) pevnost 12,3 MPa a modul pružnosti 1,5 GPa. Yildiz et al. (2005) dosáhli u dřeva klonu topolu *P. euramericana* pevnosti 27,8 MPa. Bendsten et al. (1981) zjistili u dřeva hybridu topolů *P. deltoides* a *P. nigra* pevnost 15,3 MPa a Hernández et al. (1998) 28 MPa. Dřevo turecké borovice (*Pinus sylvestris*) tepelně modifikovali Korkut et al. (2008) po dvě hodiny teplotou 180 °C. Pevnost klesla oproti referenčním vzorkům o 13 % na hodnotu 51,9 MPa. Přehled tlakových pevností dřeva ve směru vláken různých druhů topolů uvádí Balantinecz et al. (2014); *P. deltoides* 33,9 MPa, *P. trichocarpa* 31 MPa, *P. tremuloides* 29,3 MPa a *P. grandidentata* 36,5 MPa. Dále zmiňují pevnost v tlaku podél vláken u vrby (*Salix nigra*), která činí 28,3 MPa.



Obr. 45 Fotografie porušených a deformovaných vzorků po provedení testu pevnosti ve směru vláken (foto autor)

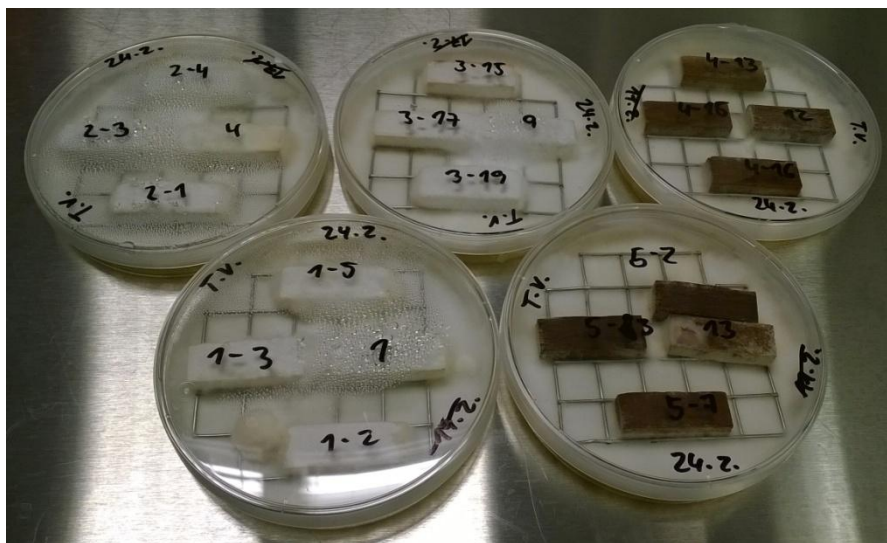
Výsledky toho testu byly similární s uvedenou odbornou literaturou. Při testu nedošlo k žádným výchytkám jako v testech předchozích. Hodnoty mohou být ovlivněny dobou expozice prostředí a charakterem materiálu vzorků

6.3 Odolnost vůči dřevokazné houbě

Vyjádření konečné odolnosti materiálu vůči působení dřevokazné houby se provádí pomocí hmotnostních úbytků. Důležitým parametrem je také vlhkost vzorků po vyjmutí z mycélia. Více informací o této problematice je uvedeno v kapitole 4.3.3.

Vzorky vykazovali vysokou variabilitu z důvodu špatného rozvoje houby v některých Petriho miskách, zejména u vzorků sad s nejintenzivnějšími režimy tepelné úpravy. Tyto extrémní hodnoty byly porovnány se vzorky buku a na základě neshody následně vyloučeny ze statistického vyhodnocení.

U výsledků průměrné hodnoty vlhkosti byla zaznamenána výchylka u skupiny 2, která je oproti průměrnému výsledku skupiny referenčních vzorků (144,51 %) vyšší o 9,2 %. Možnou příčinou je jev popsáný hypotézou v kapitole 6.1.2, nebo se jedná o špatně vybraný soubor vzorků. Další příčinou může být odlišný vývoj mycélia dřevokazné houby oproti ostatním sadám vzorků dle jednotlivých Petriho misek. Vlhkost vzorků páté skupiny byla za všech nejnižší a dosahovala hodnoty 120,37 %, pokles oproti referenčním vzorkům je 16,7 %. Tato hodnota je ale stále velmi vysoká. V porovnání s průměrnou vlhkostí kontrolních vzorků buku je vyšší o 151,77 %.



Obr. 46 Fotografie zástupců všech pěti sad vzorků v Petriho miskách na konci testu odolnosti vůči dřevokazné houbě (foto autor)

V případě hmotnostního úbytku byl vývoj hodnot dle předpokladů. Nejvíce degradaci dřevokazné houby odolaly vzorky páté skupiny. Průměrná hodnota hmotnostního úbytku byla jen 1,96 %, což je o 95,54 % méně než je hmotnostní úbytek u referenčních vzorků sady 1 (43,94 %). Výsledek skupiny modifikované stejnou teplotou ale kratším časem, 200 °C po 2 hodiny, byl výrazně vyšší a činil 28,88 %. U této skupiny byla však zaznamenána největší variabilita hodnot.

Dřevo topolu *P. deltoides* z Číny tepelně upravili Gao et al. (2016) teplotami 160 a 200 °C při dvouhodinovém režimu. Pro test odolnosti použili houbu Outkovku pestrou (*Trametes versicolor*). Hmotnostní úbytek referenčního materiálu byl 20,34 %. Tepelně upravený materiál 160°C vykazoval hodnotu nižší o 17,4 %. Konečná hodnota úbytku hmotnosti u materiálu modifikovaného teplotou 200 °C byla 12,87 % a poklesla oproti referenčnímu materiálu o 39,77 %. Colonego et al. (2010) použili pro tepelnou modifikaci dřeva eukalyptu (*E. grandis*) vypěstovaného v Brazílii dvouapůl hodinové režimy s teplotami 160 a 200 °C. Pro test biologické odolnosti použili houbu bílého tlení Outkovky krvavé (*Pycnoporus sanguineus*), kterou nechali působit po 12 týdnů. Průměrná vlhkost referenčních a modifikovaných vzorků po testu byla 244,3, 240,3 a 200 %. Průměrné hodnoty úbytků hmotnosti pak byly 34,32, 32,57 a 23,81 %. Vzhledem k hodnotě referenčních vzorků byl úbytek redukován o 30,6 %. Abreu et al. (2007) také zkoumal odolnost dřeva eukalyptu, ale použil houbu Outkovku rumělkovou (*Pycnoporus cinnabarinus*). Po osmi a šestnácti týdnech byly hmotnostní úbytky 22,57 a 28,10 %. Dřevo čínského topolu (*Populus tomentosa* Carr.) upravené teplotou 200 °C po dobu 2 a 4 hodin podrobili testu biologické odolnosti houbou Outkovkou pestrou (*Coriolus versicolor*) Cao et al. (2011). Úbytek hmotnosti byl u referenčního materiálu 55,75 %. Pro modifikovaný materiál byly hodnoty nižší, a to až o 55 % (34,28 a 25,29 %). Kunar et al. (2010) použili pro test odolnosti dřevo hybridu topolů (*P. deltoides* a *P. trichocarpa*) z Oregonu. Upravili ho pomocí procesu VTC teplotou 200 °C se stupni denzifikace 63, 98 a 132 % a poté nechali 4 a 8 týdnů působit houbu Outkovku pestrou (*Trametes versicolor*). V jednotlivých případech modifikované dřevo vykazovalo pro všechny stupně zhuštění podobné průměrné hmotnostní úbytky (4 týdny 12,2 %, 8 týdnů 33,6 %). U referenčních vzorků to pak bylo 20 a 41,3 %. Viitanen et al. (2006) zkoumali odolnost dřeva finského smrku (*Picea abies*) a borovice (*Pinus sylvestris*), na jejichž vzorky nechali po dobu šesti týdnů působit houbu hnědého tlení Poprašku sklepní (*Coniophora puteana*). Hmotnostní úbytky u dřeva smrku se pohybovaly asi od 20 do 25 %, u dřeva borovice zhruba od 12 do 25 %. Další test odolnosti provedli Boonstra et al. (2007a). Tepelně upravili dřevo borovice jako předchozí autoři a navíc použili dřevo buku (*Fagus sylvatica*). Režimy pro hydro-termolytickou tepelnou úpravu byly 165 až 185 °C po dobu 30 minut. Poté proběhla fáze vytvrzení ve 180°C po dobu šesti hodin. Dřevo vystavili působení houby Outkovky pestré (*C. versicolor*) po dobu 16 týdnů. Konečné průměrné hodnoty hmotnostního úbytku byly pro dřevo borovice bez větší závislosti na teplotě úpravy a celkově činily asi 17 %. Pro dřevo buku upraveného teplotou 175 °C byla tato hodnota zhruba 15 %. Oproti výsledku referenčních vzorků buku byl zaznamenán pokles o 60 %.

Dle výsledků je odolnost vůči působení dřevokazné houby výrazně zvýšena. Konečné hodnoty tohoto testu mohou být ovlivněny dobou působení podmínek prostředí (6 týdnů).

6.4 Výběr nejlepšího režimu úpravy

Podle Tab. 21 zobrazující výsledky všech experimentů můžeme stanovit nejvhodnější režim tepelné modifikace.

Na tuto problematiku je ale možno nahlížet podle několika aspektů, a to vybrat režim dle nejlepších průměrných výsledků jednotlivých experimentů, anebo se zaměřit na nejvhodnější vlastnosti vzhledem k využití materiálu na budoucí výrobek. Toto téma bude blíže rozebráno v kapitole 6.5.

Vzhledem ke kritériu týkající se hmotnostního úbytku vlivem tepelné modifikace uvedeném v kapitole 6.1.1 nelze sady vzorků 2 a 3 považovat ze správně tepelně modifikovány a proto je můžeme z výběru nejlepšího režimu úpravy vynechat. U zbylých skupin 4 a 5 došlo k předpokládanému hmotnostnímu úbytku a zlepšení vlastností souvisejících se sorpčními schopnostmi dřeva. Dále byl zlepšen modul pružnosti v ohybu, pevnost v tlaku podél vláken a odolnost vůči dřevokazné houbě. Snížen byl také hmotnostní úbytek vlivem vyluhování. Naopak degradace polysacharidických složek dřeva během tepelné modifikace způsobila snížení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v tlaku podél vláken. Mezi průměrnými výsledky režimů skupin 4 a 5 (200 °C, 2 a 4 hodiny) je největší rozdíl u pevnosti v ohybu, biologické odolnosti a vlastností spojených s přijímáním vody, kdy lepších hodnot dosahuje skupina 5.

Po zevrubném zvážení všech technologických podmínek, nákladů a dalších faktorů a s přihlédnutím k nejlepšímu možnému celkovému výkonu materiálu byl jako optimální zkoumaný režim tepelné úpravy vybrán režim číslo 4, tedy s teplotou 200 °C působící na dřevo po dobu dvou hodin. Čtyřhodinový režim už ve dřevě způsobí radikální změny a výsledný materiál se hodí jen pro určitá použití viz kapitola 6.5.

Wang et al. (2015) stanovili svým experimentem zkoumajícím nejvhodnější podmínky tepelné úpravy dřeva čínského hybridu topolu režim s teplotou 180 °C a časem 3,5 hodiny. Pro porovnání performovali několik režimů s teplotami od 170 do 210 °C, vždy s odstupem 10°C a s časy od 1,5 do 4,5 hodiny s rozdílem jedné hodiny.

6.5 Posouzení možnosti využití materiálu na výrobky

Nyní je možné se zaměřit na nejlepší vlastnosti materiálu získané po tepelné úpravě vzhledem k jeho využití na budoucí výrobky.

I přes nedostatek u sad vzorků 2 a 3 popsany v kapitole uvedené výše zmíním vlastnosti výsledného materiálu kvůli odchylkám uvedeným v kapitolách 6.1.4 a 6.2.1. První odchylka se týká průměrných hodnot bobtnání a účinnosti omezení bobtnání. Díky zvýšené hustotě vzorků byly hodnoty těchto vlastností oproti referenčnímu materiálu vyšší. Rovnovážná vlhkost materiálu byla snížena ale jen minimálně. Z toho plyne, že tento materiál není vhodný do prostředí s častou změnou vlhkosti. Mohlo by docházet k borcení prvku a případně k jeho napadení dřevokaznou houbou. Takovýto materiál není tedy vhodný pro venkovní použití například na obklady nebo terasy. Naopak druhá odchylka ve vlastnostech materiálu

skupin 2 a 3, týkající se ohybové pevnosti a modulu pružnosti v ohybu, může být výhodou. Při porovnání s vlastnostmi referenčního materiálu došlo totiž ke zlepšení uvedených vlastností a to hlavně u skupiny 3. Pevnost ve statickém ohybu a modul pružnosti v ohybu byly zvýšeny o 1,43 a 5,07 %. Zejména hodnota prvně jmenované vlastnosti, 61,75 MPa může být srovnávána s tepelně modifikovaným dřevem některých jehličnatých dřevin, například smrku a jedle (Allegretti et al. 2012). Tento materiál je možné použít v interiéru na konstrukční prvky nábytku nebo u dřevostaveb na konstrukce, kde bude výhodou nízká hmotnost konečného prvku. Vhodné užití může být například na rošt nezatížených dělicích konstrukcí.

V případě materiálu čtvrté sady vzorků došlo ke snížení jeho sorpčních vlastností. Odolnost vůči biotické degradaci ale není dostatečná. Proto lze tento materiál použít pouze do interiéru ale tam, kde dochází k občasnému zvýšení vlhkosti prostředí, případně mírnému ostříku vody. Výhodou také může být vysoký modul pružnosti v ohybu. Tento materiál je možné použít do saun a koupelen na obklady, nábytek nebo další doplňky těchto prostor. Největší rozměrovou stálost a odolnost vůči napadení a degradaci dřevokazných hub má materiál získaný po modifikaci nejintenzivnějším režimem páté skupiny vzorků. Pevnostní charakteristiky jsou nízké, ale sorpční vlastnosti výborné. Například účinnost omezení bobtnání byla skoro 40 % a hmotnostní úbytek po působení dřevokazné houby činil méně než 2 %. Tato hodnota podle CEN/TS 15083-1 (2005) řadí materiál do první třídy odolnosti jako velmi odolný. Díky těmto vlastnostem je materiál skupiny 5 možné použít v exteriéru na obklady staveb a jejich konstrukčních částí, prvky teras a pergol, venkovní nábytek atd. V interiéru je materiál přijatelné užit jako obklad nevzhledných konstrukcí, například železobetonových, v prostorách s trvale zvýšenou vlhkostí prostředí jako jsou bazény, parní lázně nebo koupelny. Samozřejmě je pak použití na doplňkové součásti těchto prostor, kterými mohou být lehátka, rošty výdechů vytápění, nábytek a další.

Z uvedených materiálů dosáhla na požadované vlastnosti srovnatelné s konkurenčními materiály dostupnými na trhu pouze pátá skupina vzorků. Je zde tedy prostor pro širší analýzu režimů tepelné modifikace, případně pro vývoj procesu sledujícího vlastnosti vstupního materiálu. Mohl by tak vzniknout materiál se širokým spektrem použití nebo naopak s konečnými vlastnostmi cílenými na určité použití ve výrobcích.

7 Závěr

Na základě výše uvedených výsledků a zhodnocení vlastností materiálů podrobných expertýze lze v závěru říci, že bylo dosaženo požadovaných výsledků a cíle práce byly splněny.

V literárním přehledu byla nastíněna problematika vybraných procesů tepelné modifikace dřeva a jejich vliv na vlastnosti dřeva. Dále byl vytvořen přehled o dopadech procesů na životní prostředí a použití materiálu na konečné výrobky. Shrnut byl také obor zabývající se pěstováním rychle rostoucích dřevin a to hlavně hybridů topolů, včetně souhrnu vlastností jejich dřeva a možností jeho modifikace známými způsoby.

Poté byl proveden výzkum vlastností modifikovaných materiálů dle informací uvedených v metodice práce. Spektrum zkoumaných vlastností bylo zvoleno jako co možná nejširší s ohledem na konečnou vypovídající schopnost výsledků a minimální rozsah této práce.

Výsledky experimentů potvrdily očekávané zlepšení vlastností spojených se sorpčními pochody ve dřevě a zhoršení mechanických vlastností původního materiálu až na odchytku, jejichž příčiny je možné vysvětlit pomocí hypotézy uvedené v diskuzi. Zde je také uveden pravděpodobný důvod zvýšení hustoty u materiálu modifikovaného nižší teplotou. Materiál páté sady vzorků je možné porovnat s jinými materiály podobného charakteru, které jsou již dlouhou dobu dostupné na světovém trhu. Pro ucelení celkového přehledu o materiálových vlastnostech a upevnění tvrzení o konkurenceschopnosti by bylo nutné provést ještě další doplňující experimenty a proto je zde ještě prostor pro další výzkum materiálů pocházejících ze dřeva rychle rostoucích plantážově pěstovaných topolů.

Hlavní myšlenkou této práce bylo prozkoumat míru zlepšení vlastností dřeva klonu topolu po aplikaci procesu tepelné modifikace. Dřevo plantážově pěstovaného topolu má velký potenciál pro budoucí využití. Modifikování jeho vlastností je jeden z výborných způsobů, jak tímto velmi levným a rychle rostoucím materiálem nahradit vysoce jakostní materiály a ušetřit je jen pro speciální účely například v nosných konstrukcích dřevostaveb.

8 Summary

According to previously described results and evaluation of the thermally modified hybrid poplar and its material properties it can be concluded that appropriate results were presented the desired aims and objectives of present work were successfully achieved

The literature review summarized the basic knowledge of thermal modification processes of wood and its influence on the material properties of wood. Furthermore, the impact of processes on the environment and utilization of this material for final products give on market have been mentioned. Additionally, the topic dealing with recalls fast growing trees, mainly poplars hybrids, including a review of the wood properties and its possible improvements/modifications with commonly known methods.

Research of the physical and mechanical properties of thermally modified wood was done according to the material and methods presented in chapter 4 within this work. A selected physical and mechanical property has been chosen as the widest possible view of the ultimate result information capability and minimum scope of this work.

The experimental results confirmed the expected improvement in material properties associated with sorption behaviour, dimensional stability and biodegradability of wood and decrease in mechanical properties compared to control wood, besides of exceptions, which were hypothesized and discussed in chapter 6. The possible reasons which led to increase of density within mild treated group has been discussed further. Properties of wood which came from the most severe process can be considered as competitive with other materials with similar nature, which are available on the world market for many years. For a comprehensive overview and complex research study of material properties and strengthen of statements about its competitiveness, it would be necessary to make additional experiments and therefore there seems to be a gap for further research of fast-growing wood species as plantation grown poplar.

The main aim of this work was to examine the possibilities of improvement the properties of poplar clones wood using thermal modification. Plantation grown poplar has great potential for future use. Modification of material properties is one of the great ways how this low-cost and fast-growing material can replace high-quality and valuable materials and save it only for special purposes, for example in the supporting structures of timber buildings.

9 Literatura

- ABRAHAM, J., NEMETH, R., MOLNAR, S. 2010. Thermomechanical densification of Pannonia Poplar. In: *Proceedings of the final conference of COST Action E53: „Quality control for wood & wood products“* 4-7th May, Edinburgh. 2010.05.04-2010.05.10. pp. 282-292. [http://www.coste53.net/downloads/Edinburgh/Edinburgh Presentation/44.pdf](http://www.coste53.net/downloads/Edinburgh/Edinburgh%20Presentation/44.pdf).
- ABRAHAM, J., NEMETH, R. 2012. Physical and mechanical properties of thermo-mechanically densified poplar, *Proceedings International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint*, Sopron, Hungary.
- ABREU, L. D., MARINO, R. H., MESQUITA, J. B., RIBEIRO, G. T. 2007. Degradação da madeira de Eucalyptus sp. por basidiomicetos de podridão branca. *Arq. Inst. Biol.* 74 (4), 321–328.
- AHMED, S. A., MORÉN, T. 2012. Moisture properties of heat-treated Scots pine and Norway spruce sapwood impregnated with wood preservatives. *Wood Fiber Sci* 44:85–93.
- ALLEGRETTI, O., BRUNETTI, M., CUCCUI, I., FERRARI, S., NOCETTI, M., TERZIEV, N. 2012. Thermo-vacuum modification of spruce (*Picea abies* KARST.) and fir (*Abies alba* MILL.) wood, *BioResources* 7(3), 3656-3669.
- ANDERSSON, S., SERIMAA, R., VÄÄNÄNEN, T., PAAKKARI, T., JÄMSÄ, S., VIITANIEMI, P. 2005. X-ray scattering studies of thermally modified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Holzforschung* 59:422–427.
- ANON. 2003. *ThermoWood handbook*. Finish ThermoWood Association, Helsinki, Finland. 66 pp.
- AYADI, N., LEJEUNE, F., CHARRIER, F., CHARRIER, B., MERLIN, A. 2003. Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. *Holz als Roh und Werkstoff* 61: 221-226.
- BAK, M., NEMETH, R. 2012. Changes in swelling properties and moisture uptake rate of oil-heat-treated poplar (*Populus x euramericana* cv. Pannonia) wood. *Bioresources* 7(4):5128-5137.
- BAL, C. B. 2013. Effect of heat treatment on the physical properties of heartwood and sapwood of *Cedrus libani*, *BioResources* 8(1), 211-219.
- BAL, C. B. 2015. Physical properties of beech wood thermally modified in hot oil and in hot air at variol temperatures, *Maderas-Cienc Technol.* 17(4):789–798, DOI:10.4067/S0718221X2015005000068.
- BALABÁN, K., KOTLABA, F. 1970. *Atlas dřevokazných hub*. Praha: Státní zemědělské nakladatelství. 133 s.
- BALANTINECZ, J., KRETSCHMANN, D. E., LECLERCQ, A. 2001. Achievements in the utilization of poplar wood – guideposts for the future. *For. Chron.* 77, 265–269.

- BALANTINECZ, J., MERTENS, P., BOEVER, L. D., YUKUN, H., JUWAN, J., VAN ACKER, J. 2014. Properties, processing and utilization. In: *Poplars and willows: Trees for society and the environment* (pp. 527e561).
- BARBA, C., MONTANE, D., RINAUDO, M., FARRIOL, X. 2002. Synthesis and characterization of carboxy methyl celluloses (CMC) from non-wood fibers. I. Accessibility of cellulose fibers and CMC synthesis. *Cellulose* 9, 319–326.
- BEAUDOIN, M., HERNANDEZ, R. E., KOUBAA, A., POLIQUIN, J. 1992. Interclonal, intraclonal, and within-tree variation in wood density of poplar hybrid clones. *Wood Fiber Sci.* 24(2): 147-153.
- BEKHTA, P., NIEMZ, P. 2003. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung.* 57(5), 539-546.
- BENDSTEN, B. A., MAEGLIN, R. R., DENEKE, F. 1981. Comparison of mechanical and anatomical properties of eastern cottonwood and Populus hybrid NE-237. *Wood Sci.* 14, 1–14.
- BENGTSSON, C., JERMER, J., BREM, F. 2002. Bending strength of heat-treated spruce and pine timber, In: *International Research Group Wood Pre*, Section 4-Processes, N^o IRG/WP 02–40242.
- BIZIKS, V., ANDERSONS, B., SANSONETTI, E., ANDERSONE, I., MILITZ, H., GRININS, J. 2014. One-stage thermo-hydro treatment (THT) of hardwoods: an analysis of form stability after five soaking-drying cycles. *Holzforschung* 69(5):563–571.
- BOONSTRA, M., TJEERDSMA, B., GROENEVELD, H. 1998. Thermal modification of nondurable wood species. 1. The PLATO technology: thermal modification of wood. *International Research Group on Wood Preservation*, Document no. IRG/WP 98-40123.
- BOONSTRA, M., TJEERDSMA, B. 2006. Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz Roh- Werkstoff* 64(3):204–211.
- BOONSTRA, M., RIJSDIJK, J., SANDER, C., KEGEL, E., TJEERDSMA, B., MILITZ, H., VAN ACKER, J., STEVENS, M. 2006A. Microstructural and physical aspects of heat treated wood. Part 1. Softwoods. *Maderas-Cienc Technol.* 8(3):193–208.
- BOONSTRA, M., RIJSDIJK, J., SANDER, C., KEGEL, E., TJEERDSMA, B., MILITZ, H., VAN ACKER, J., STEVENS, M. 2006B. Physical aspects of heat-treated wood. Part 2. Hardwoods. *Maderas-Cienc Technol.* 8(3):209–217.
- BOONSTRA, M., VAN ACKER, J., TJEERDSMA, B., KEGEL, E. 2007. Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents. *Ann. Forest Sci.* 64(7): 679–690.
- BOONSTRA, M. J., VAN ACKER, J., KEGEL, E., STEVENS, M. 2007A. Optimisation of a two-stage heat treatment proces: durability aspects, *Wood Sci Technol* 41:31–57, DOI 10.1007/s00226-006-0087-4.
- BOONSTRA, M. 2008. *A two-stage thermal modification of wood*, Ph.D. Thesis in Applied Biological Sciences: Soil and Forest management. Henry Poincaré University-Nancy, France.

- BOURGOIS, J., BARTHOLIN, M., GUYONNET, R. 1989. Thermal treatment of wood: Analysis of the obtained product. *Wood Sci. Technol.* 23(4):303–310.
- BRAVERY, A. F. 1978. A miniaturised wood-block test for the rapid evaluation of preservative fungicides. IRG/WP 2113. *International Research Group on Wood Protection*, Stockholm, Sweden.
- BRISCHKE, C., WELZBACHER, C. R., BRAND, K., RAPP, A. O. 2007. Quality control of thermally modified timber: Interrelationship between heat treatment intensities and CIE L*a*b color data on homogenized wood samples, *Holzforschung* 61(1), 19-22.
- BS 373. 1957. *Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*. British Standard Institution, London, UK.
- BURMESTER, A. 1973A. Einfluss einer Wärme-Druck-Behandlung haldtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. *Holz Roh-Werkst* 31(6):237–243.
- BURMESTER, A. 1973B. Investigation on the dimensional stabilization of wood, Bundesanstalt für Materialprüfung, *Berlin-Dahlem*, 50–56.
- BURMESTER, A. 1975. Zur Dimensionsstabilisierung von Holz. *Holz Roh-Werkst* 33(9):333–335.
- BURMESTER, A., WILLE, W. E. 1976. Quellungsverminderung von Holz in Teilbereichen der relativen Luftfeuchtigkeit. *Holz Roh-Werkst* 34(3):87–90.
- CANDAN, Z., HIZIROGLU, S., MCDONALD, A. G. 2010. Surface quality of thermally compressed Douglas fir veneer. *Mater. Des.* 31, 3574-3577. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.02.003>.
- CANDAN, Z.; KORKUT, S.; UNSAL, O. 2013. Effect of thermal modification by hot pressing on performance properties of paulownia wood boards. *Ind. Crop. Prod.* (In Press). <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.12.024>.
- CAO, Y., LU, J., HUANG, R., ZHAO, Y., WU, Y. 2011. Evaluation of decay resistance for steam-heat-treated wood, *BioResources* 6(4), 4696-4704.
- CAO, Y., LU, J., HUANG, R., JIANG, J. 2012. Increased dimensional stability of Chinese fir through steam-heat treatment. *Eur J Wood Prod* 70(4):441–444.
- CARLE J., HOLMGREN, P. 2008. Wood from planted forests: A global outlook 2005-2030. *Forest Prod J* 58(12):6-18.
- CEN/TS 15083-1 2005. *Durability of wood and wood-based products* Determination of the natural durability of solid wood against wood-destroying fungi, test methods. Part 1: Basidiomycetes*. Brussels: European Committee for Standardization.
- CLAUDER, L., PFRIEM, A. 2013. Determination of dimensional stability of thermally modified beech and spruce wood, *Poster Iasi Webversion, HNE Eberswalde, Germany*. Available at: http://www.wood-modification.net/wp-content/uploads/2012/04/Poster_Iasi_Webversion_March2013.pdf.

- COLONEGO, F. W., SEVERO, E. T. D., FURTADO, E. L. 2010. Decay resistance of thermally-modified *Eucalyptus grandis* wood at 140 °C, 160 °C, 180 °C, 200 °C and 220 °C, *Bioresource Technology* 101 9391–9394, doi:10.1016/j.biortech.2010.06.119.
- ČERMÁK, P. 2013. *Thermal modification of wood: process and properties*. Disertační práce, Mendelova univerzita v Brně, 131 s.
- ČERMÁK, P., BRABEC, M., MILCH, J. 2013A. 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., HORÁČEK, P., RADEMACHER, P. 2014. Measured temperature and moisture profiles during thermal modification of beech (*Fagus silvatica* L.) and spruce (*Picea abies* L. Karst.) wood, *Holzforschung* 68(2), 175-183. DOI:10.1515/hf-2013-0047
- ČERMÁK, P., RAUTKARI, P., HORÁČEK, P., SAAKE, B., RADEMACHER, P., SÁBLÍK, 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.
- ČERMÁK, P., VAHTIKARI, K., RAUTKARI, L., LAINE, K., HORÁČEK, P., BAAR, J. 2015A. The effect of wetting cycles on moisture behaviour of thermally modified Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood, *J Mater Sci*, DOI 10.1007/s10853-015-9471-5.
- ČSN EN 113. 1996. *Ochranné prostředky na dřevo – Zkušební metody pro stanovení ochranné účinnosti proti dřevokazným houbám Basidiomycetes – Stanovení hranice účinnosti*, Český normalizační institut.
- ČSN EN 338. 2010. *Konstrukční dřevo*, Český normalizační institut.
- DE BOEVER, L., VANSTEENKISTE, D., VAN ACKER, J., STEVENS, M. 2007. End-use related physical and mechanical properties of selected fast-growing poplar hybrids (*Populus trichocarpa* × *P. deltoides*). *Annals of Forest Science* 64, 621–630.
- DE BOEVER, L., VAN ACKER, J., VANSTEENKISTE, D., STEVENS, M. 2008. Preservative treatment of willow wood (*Salix alba*): product retention and spatial distribution. *Wood Research* 53, 29–42.
- DE BOEVER, L. 2010. *Potential of poplar and willow wood for load-bearing constructions*. Work submitted for obtaining the degree of Doctor in Applied Biological Science.
- DE BELL, D. S., SINGLETON, R., HARRINGTON, C. A., GARTNER, B. L. 2002. Wood density and fiber length in young *Populus* stems: relation to clone, age, growth rate, and pruning. *Wood Fiber Sci.* 34 (4), 529–539.
- DEKA, G. C., WONG, B. M., ROY, D. N. 1992. Suitability of hybrid willow as a source of pulp. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 12, 197–211.

- DERR, V., KELLERT, S. R. 2013. Making children's environments "R.E.D.": Restorative environmental design and its relationship to sustainable design. Pages 31-37 In: E. Pavlides and J. Wells, eds. *Proc. 44th annual conference of the environmental design research association*, May 29., June 1., 2013, Providence, RI. The Environmental Design Research Association, McLean, VA.
- DING, W. D., KOUBAA, A., CHAALA, A., BELEM, T., KRAUSE, C. 2008. Relationship between wood porosity, wood density and methyl methacrylate impregnation rate. *Wood Mater. Sci. Eng.* 3, 62-70.
- DING, W. D., KOUBAA, A., CHAALA, A. 2013. Mechanical properties of MMA-hardened hybrid poplar wood, *Industrial Crops and Products* 46 (2013) 304-310.
- DING, W. D., KOUBAA, A., CHAALA, A. 2012. Dimensional stability of methyl methacrylate hardened hybrid poplar wood. *Bioresources* 7, 504-520.
- DOGU, D., TIRAK, K., CANDAN, Z., UNSAL, O. 2010. Anatomical investigation of thermally compressed wood panels, *BioRes.* 5(4), 2640-2663.
- DÖMÉNY, J., ČERMÁK, P., PAŘIL, P., FODOR, F. P., DEJMAL, A., RADEMACHER, P. 2015. Application of microwave heating for acetylation of beech (*Fagus sylvatica* L.) and poplar (*Populus hybrids*) wood, *BioResources* 10(4), 8181-8193.
- DRÁPELA, K., ZACH, J. 2002. *Statistické metody I.: pro obory lesního, dřevarského a krajinného inženýrství*. dotisk. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 80-715-7416-3.
- DWIANTO, W., INOUE, M., NORIMOTO, M. 1997. Fixation of Compressive Deformation of Wood by Heat Treatment. *Mokuzai Gakkaishi/Journal of the Japan Wood Research Society* 43, 303.
- EKATALOG BPEJ. 2015. [online] [cit. 2016-02-07]. Dostupné z: <http://bpej.vumop.cz/32152>.
- ESTEBAN, L. G., GRIL, J., DE PALACIOS, P. D. P., CASASUS, A. G. 2005. Reduction of wood hygroscopicity and associated dimensional response by repeated humidity cycles. *Ann For Sci* 62(3):275-284
- ESTEVEZ, B. M., DOMINGOS, I. J., VELEZ MARQUES, A., NUNES, L., PEREIRA H. 2006. Variation of dimensional stability and durability of eucalypt wood by heat treatment. Pages 185-194 in *Proc ECOWOOD 2006*, Fernando. Pessoa University, Oporto, Portugal.
- ESTEVEZ, B., VELEZ MARQUES, A., DOMINGOS, I., PEREIRA, H. 2007. Influence of steam heating on the properties of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Science and Technology*.41:193-207. DOI: 10.1007/s00226-006-0099-0.
- ESTEVEZ, B. M. DOMINGOS, I. J. PEREIRA H. M. 2007A. Improvement of technological quality of eucalypt wood by heat treatment in air at 170-200°C. *Forest Products Journal*, 57 (1/2), 47-52.

- ESTEVEES, B., VELEZ MARQUES, A., DOMINGOS, I., PEREIRA, H. 2008. Heat induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalypt (*Eucalyptus globulus*) wood. *Wood Sci. Technol.* 42(5) 369–384.
- ESTEVEES, B. M., DOMINGOS, I. J., PEREIRA H. M. 2008A. Pine wood modification by heat treatment in air. *BioRes.* 3(1), 142-154.
- ESTEVEES, B., PEREIRA, H. 2009. Wood modification by heat treatment a review. *BioRes.* 4(1):370–404.
- FANG, S., YANG, W., TIAN, Y. 2006. Clonal and within tree variation of microfibril angle in poplar clones. *New Forests* 31, 373–383.
- FAO 2012. Improving lives with poplars and willows. Synthesis of Country Progress Reports - Activities Related to Poplar and Willow Cultivation and Utilization- 2008 through 2011. *24th Session of the International Poplar Commission*, Dehradun, India, 30 Oct-2 Nov 2012. Working Paper IPC/12. 93p. Forest Assessment, Management and Conservation Division, FAO, Rome. Available at: <http://www.fao.org/forestry/ipc2012/en/>.
- FENGEL, D. 1966A. On the changes of the wood and its components within the temperature range up to 200°C - Part 1. *Holz Roh-Werkst* 24:9–14.
- FENGEL, D. 1966B. On the changes of the wood and its components within the temperature range up to 200°C - Part 2. *Holz Roh-Werkst.* 24:98–109.
- FENGEL, D., WEGENER, G. 1989. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, Berlin, 613 p.
- FILLÓ, Z., PERES, T. 1970. *Holztechnologie* 11, 270–273, Cited In: Fengel and Wegener (1989).
- FINNISH THERMOWOOD ASSOCIATION 2016. *ThermoWood - Products statistics 2015*, Finland, Available at: <https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/Productionstatistics2015.pdf>
- FORSMAN, S. 2008. *Heat treated wood - the concept house development*, master thesis, Luleå University of Technology, Sweden, ISSN: 1402-1617.
- FUJIWARA, S., YANG, K. C. 2000. The relationship between cell length and ring width and circumferential growth rate in five Canadian species. *IAWA J.* 21(3): 335–345.
- GAO, Z., SU, W., WU, D., 2009A. Polyurethane-solid wood composites. II. Flammability parameters. *J. Appl. Polym. Sci.* 113, 3279–3285.
- GAO, Z., WU, D., SU, W., DING, X., 2009B. Polyurethane-solid wood composites prepared with various catalysts. I. Mechanical properties and dimensional stabilities. *J. Appl. Polym. Sci.* 111, 1293–1299.
- GAO, H., SUN, M. Y., CHENG, H. Y., GAO W. L., DING, X. L. 2016. Effect of heat treatment under vacuum on properties of poplar, *BioResources* 11(1), 1031-1043.
- GIEBELER, E. 1983. Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck - Behandlung. *Holz Roh-Werkst* 41(3):87–94.

- GONZÁLES-GARCÍA, S., GASOL, C. M., GABARRELL, X., RIERADEVALL, J., MOREIRA, M. T., FEIJOO, G. 2010. Environmental profile of ethanol from poplar biomass as transport fuel in Southern Europe. *Renewable Energy* 35, 1014–1023.
- GOSSELINK, R. J. A., DE JONG, E., GURAN, B., ABÄCHERLI, A. 2004. Coordination network for lignin-standardisation, production and applications adapted to market requirements (EUROLIGNIN). *Ind Crop Prod* 20(2):121–129.
- GROMOV, V., KHROL, Y., DEGINA, R. 1972. *Zb. Pr. Drev. Fak. Vys. Sk. Les. Drev. Zvo-len Cited In: Fengel and Wegener (1989)*.
- GULLER, B. 2012. Effects of heat treatment on density, dimensional stability and color of *Pinus nigra* wood. *Afr J Biotechnol* 11(9):2204–2209.
- HAKKOU, M., PÉTRISSANS, M., ZOULALIAN, A., GÉRARDIN, P. 2005. Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis. *Polym Degrad Stab* 89(1):1–5.
- HALE, M. D., GHOSH, S. C., SPEAR, M. J. 2005. Effects of artificial UV weathering and soft rot decay on heat treated wood (Doc. No. IRG/WP 05–40302). *International Research Group on Wood Preservation*.
- HAVÍŘOVÁ, Z. 2006. *Dům ze dřeva*. 2. vyd. Brno: ERA, 99 s. ISBN 80-7366-060-1.
- HERNANDÉZ, R. E., KOUBAA, A., BEAUDOIN, M., FORTIN, Y. 1998. Selected mechanical properties of fast-growing poplar hybrid clones. *Wood Fiber Sci.* 30, 138–147.
- HIETALA, S., MAUNU, S., SUNDHOLM, F., JÄMSÄ, S., VIITANIEMI, P. 2002. Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements. *Holzfor-schung* 56(5):522–528.
- HIGASHIHARA, T., MOROOKA, T., NORIMOTO, M. 2001. Permanent fixation of transversely compressed wood by heating and its mechanism. *Mokuzai Gak-kaishi/Journal of the Japan Wood Research Society* 47, 205–211.
- HILL, C. A. M. 2006. *Wood modification: chemical, thermal, and other processes*. 1. vyd. Chichester: England: John Wiley & Sons. 239 s.
- HILL, C. A. M. 2011. Wood modification: an update, *BioRes.* 6(2), 918–919.
- HILL, C. A. M., RAMSAY, J., KEATING, B., LAINE, K., RAUTKARI, L., HUGHES, M., CON-STANT, B. 2012. The water vapour sorption properties of thermally modified and densified wood. *J Mater Sci* 47(7):3191–3197.
- HOFMANN, T., WETZIG, M., RÉTFALVI, T., SIEVERTS, T., BERGEMANN, H., NIEMZ, P. 2013. Heat-treatment with the vacuum-press dewatering method: chemical properties of the manufactured wood and the condensation water. *Eur. J. Wood Prod* 71(1):12–127.
- HOMAN, W., TJEERDSMA, B., BECKERS, E., JORISEEN, A. 2000. Structural and other properties of modified wood, In: *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering 5.*, Bern, Switzerland, CIB-W18, CD-ROM.
- HORÁČEK, P. 1998. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 1. vyd. Brno: Men-delova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 124 s. ISBN 80-7157-347-7.

- HORNÍČEK, S., RADEMACHER, P., KUTNAR, A., KAMKE, F. A., ROUSEK, R. 2015. Selected physical and mechanical properties of viscoelastic thermal compressed wood from fast growing poplar, *Pro Ligno*, Vol. 11 Issue 4 ISSN 2069-7430, pp. 324-329.
- HUDA, A. S. M. A., KOUBAA, A., CLOUTIER, A., HERNANDÉZ, E. R., FORTIN, Y. 2014. Variation of the physical and mechanical properties of hybrid poplar clones, *BioResources* 9(1), 1456-1471.
- CHIRKOVA, J., ANDERSONS, B., ANDERSONE, I. 2005. Water sorption properties of thermo-modified wood. In: *Proceedings of the Second European Conference on Wood Modification*, Göttingen, Germany, October 6–7, pp. 65–69.
- CHRIS, G., FREDERICK, A. K. 2008. Treatment of chemically modified wood with VTC process to improve dimensional stability. *Forest Products Journal* 58, 82.
- INOUE, M., NORIMOTO, M., TANAHASHI, M., ROWELL, R. M. 1993A. Steam or heat fixation of compressed wood, *Wood and Fiber Science* 25, 224-235.
- INOUE, M., OGATA, S., KAWAI, S., ROWELL, R., NORIMOTO, M. 1993B. Fixation of Compressed Wood Using Melamine-Formaldehyde Resin. *Wood and Fiber Science* 25, 404-410.
- INOUE, M., SEKINO, N., MOROOKA, T., ROWELL, R. M., NORIMOTO, M. 2008. Fixation of compressive deformation in wood by pre-steaming. *Journal of Tropical Forest Science* 20, 273-281.
- JERMER, J., BENGTSSON, C., BREM, F., CLANG, A., EK-OLAUSSON, B., EDLUND, M-L. 2003. Heat-treated wood – durability and technical properties. *SP Swedish National Testing and Research Institute*, SP Report 2003:25.
- JOHANSSON, D., MORÉN, T. 2006. The potential of colour measurement for strength prediction of thermally treated wood. *Holz Roh-Werkst* 64(2):104-110.
- JOUREZ, B., RIBOUX, A., LECLERQ, A. 2001. Anatomical characteristics of tension wood and opposite wood in young inclined stems of poplar (*Populus euramericana* CV “Ghoy”). *IAWA J* 22: 133–157.
- JÜRGENSEN, C., KOLLERT, W., LEBEDYS, A. 2014. Assessment of industrial roundwood production from planted forests. *FAO Planted Forests and Trees Working Paper* FP/48/E. Rome. Available at: <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/>.
- KAMDEN, D., PIZZI, A., JERMANNAUD, A. 2002. Durability of heat-treated wood. *Holz Roh-Werkst* 60(1):1–6.
- KAMKE F. A. 2006. Densified radiata pine for structural composites. *Maderas. Ciencia y tecnología* 8, 83-92.
- KAMKE, F. A., SIZEMORE, H. 2008. *Viscoelastic Thermal Compression of Wood*. U. S. Patent No. 7,404,422 B2. July 29, 2008.
- KAWAI, S., WANG, Q., SASAKI, H., TANAHASHI, M. 1992. Production of compressed veneer lumber by steam pressing. *Proceedings of Pacific Rim Biobased Composite Symposium* pp. 139-149.

- KELLERT S. R. 2008. Dimensions, elements and attributes of biophilic design. Pages 3-19 in Kellert, S. R., Heerwagen, J. H. and Mador, M. L. eds. *Biophilic design: The theory, science and practice of bringing buildings to life*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- KOCAEFE, D., YOUNSI, R., CHAUDRY, B., KOCAEFE, Y. 2006. Modeling of heat and mass transfer during high temperature treatment of Aspen. *Wood Sci Technol* 40(5):371–391.
- KOCAEFE, D., PONCSAK, S., BOLUK, Y. 2008. Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen. *BioRes* 3(2):517–537.
- KORD, B., KIALASHAKI, A., KORD, B. 2010. The within-tree variation in wood density and shrinkage, and their relationship in *Populus euramericana*, *Turk J Agric For* 34, 121-126, doi:10.3906/tar-0903-14.
- KORKUT, S., AKGÜL, M., DÜNDAR, T. 2008. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood, *Bioresource Technology* 99 (2008) 1861–1868, doi:10.1016/j.biortech.2007.03.038.
- KOUBAA, A., DING, W. D., CHAALA, A., BOUAFIF, H. 2012. Surface properties of methyl methacrylate hardened hybrid poplar wood. *J. Appl. Polym. Sci.* 123, 1428–1436.
- KOUBAA, A., HERNANDEZ, R. E., BEAUDOIN, M. 1998A. Shrinkage of fast-growing hybrid poplar clones. *Forest Products Journal* 48, 82–87.
- KOUBAA, A., HERNANDEZ, R. E., BEAUDOIN, M., POLIQUIN, J. 1998B. Interclonal, intraclonal and within-tree variation in fiber length of poplar hybrid clones. *Wood Fiber Science* 30, 40–47.
- KUTNAR, A., KAMKE, F. A., SERNEK, M. 2008A. The mechanical properties of densified VTC wood relevant for structural composites, *Holz Roh Werkst* 66: 439–446, DOI 10.1007/s00107-008-0259-z.
- KUTNAR, A., KAMKE, F. A., PETRIČ, M., SERNEK, M. 2008B. The influence of viscoelastic thermal compression on the chemistry and surface energetics of wood. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* 329 82–86, doi:10.1016/j.colsurfa.2008.06.047.
- KUTNAR, A., KAMKE, F. A., SERNEK, M. 2009. Density profile and morphology of viscoelastic thermal compressed wood, *Wood Sci Technol* 43:57–68, DOI 10.1007/s00226-008-0198-1.
- KUTNAR, A., HUMAR, M., KAMKE, F.A., SERNEK, M. 2010. Fungal decay of viscoelastic thermal compressed (VTC) wood. *European Journal of Wood and Wood Products*, Springer Verlag, 69 (2), pp.325-328. doi:10.1007/s00107-010-0432-z.
- LAINE, K., BELT, T., RAUTKARI, L., RAMSAY, J., HILL, C. A. M., HUGHES, M. 2013. Measuring the thickness swelling and set-recovery of densified and thermally modified Scots pine solid wood, *J Mater Sci* 48:8530–8538, DOI 10.1007/s10853-013-7671-4.

- LAINE, K., RAUTKARI, L., HUGES, M., KUTNAR, A. 2013A. Reducing the set-recovery of surface densified Scots pine wood by hydrothermal post-treatment, *Eur. J. Wood Prod.* 71:17–23, DOI 10.1007/s00107-012-0647-2.
- LENTH, C. A. 1999. *Wood material behaviour in severe environments*. Ph.D dissertation. Virginia Tech, Blacksburg.
- LENTH, C. A., KAMKE F. A. 2001. Moisture dependent softening behaviour of wood. *Wood Fiber Sci* 33(3):492–507.
- LI, J. 2002. *Wood science* (in Chinese), China Higher Education Press, Beijing.
- LI, X., CAI, Z., MOU, Q., WU, Y., LIU, Y. 2011c. Effect of heat treatment on some physical properties of douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*) wood, *Advanced Materials Research Vols.* 197-198, pp 90-95, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.197-198.90.
- LI, Y., DONG, X., LIU, Y., LI, J., WANG, F., 2011A. Improvement of decay resistance of wood via combination treatment on wood cell wall: swell-bonding with maleic anhydride and graft copolymerization with glycidyl methacrylate and methyl methacrylate. *Int. Biodeter. Biodegr.* 65, 1087–1094.
- LI, Y. F., LIU, Y. X., WANG, X. M., WU, Q. L., YU, H. P., LI, J., 2011B. Wood-polymer composites prepared by the in situ polymerization of monomers within wood. *J. Appl. Polym. Sci.* 119 (6), 3207–3216.
- LI, Y., GONG, D., DONG, X., LIU, Z., 2012A. Mechanical properties of wood-polymer composite prepared by in-situ polymerization of methyl methacrylate and styrene. *Appl. Mech. Mater.* 166–169, 2938–2941.
- LI, Y., WU, Q., LI, J., LIU, Y., WANG, X. M., LIU, Z., 2012B. Improvement of dimensional stability of wood via combination treatment: swelling with maleic anhydride and grafting with glycidyl methacrylate and methyl methacrylate. *Holzfor-schung* 66, 59–66.
- LI, Y., DONG, X., LU, Z., JIA, W., LIU, Y., 2013. Effect of polymer in situ synthesized from methyl methacrylate and styrene on the morphology, thermal behavior, and durability of wood. *J. Appl. Polym. Sci.* 128, 13–20.
- LIGERO, P., VILLAVERDE, J. J., VEGA, A., BAO, M. 2008. Pulping cardoon (*Cynara cardunculus*) with peroxyformic acid (MILOX) in one single stage. *Bioresource Technology*, 99, 5687–5693.
- MACLEAN, J. D. 1941. Thermal conductivity of wood, *Heat Pipe Air Cond.* 13:380–391.
- MAEJIMA, H., ENDO, K., OBATAYA, E. 2015. Effects of moistening treatment on the hygroscopicity and the vibrational properties of aged wood. Page 247 in Proc. *International Association of Wood Products Societies (IAWPS) 2015*, International Symposium on Wood Science and Technology, March 15-17, 2015, Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan.
- MANNINEN, A. M., PASANEN, P., HOLOPAINEN, J. K. 2002. Comparing the VOC emissions between air-dried and heat-treated Scots pine wood. *Atmos Environ* 36(11):1763–1768.

- MANTAU ET AL. 2010. *EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests*. Final report. Hamburg/Germany, June 2010, 160p.
- MATOVIČ, A., 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. VŠZ Brno, 212 s. ISBN 80-7157-086-9.
- MATYÁS, C., PESZLEN, I. 1997. Effect of age on selected wood quality traits of poplar clones. *Silvae Genet* 46, 64-72.
- MAYES, D., OKSANEN, O. 2002. *Thermowood Handbook*, Thermowood, Finnforest, Stora.
- MCDONALD, A., FERNANDEZ, M., KREBER, B. 1997. Chemical and UV-VIS spectroscopic study on kiln brown stain formation in radiata pine. In: *9th International Symposium of Wood and Pulping Chemistry*, Montreal, Canada 70, 1-5.
- MCKEEVER, T., SPELTER, H. 1998. Wood-based panel plant locations and timber availability in selected U. S. states. *Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-103*. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- METSÄ-KORTELAJAINEN, S., ANTIKAINEN, T., VIITANIEMI, P. 2006. The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170 °C, 190 °C, 210 °C and 230 °C, *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 192-197, DOI 10.1007/s00107-005-0063-y.
- MIKLEČIĆ, J., JIROUŠ-RAJKOVIĆ, V., ANTONOVIĆ, A., ŠPANIĆ, N. 2011. Discolouration of thermally modified wood during simulated indoor sunlight exposure, *BioResources* 6(1), 434-446. DOI: 10.15376/biores.6.1.434-466.
- MILITZ, H., TJEERDSMA, B. 2000. Heat treatment of wood by the Plato-process. *Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe"*, Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- MILITZ, H. 2002. Heat treatment of wood: European processes and their background. In: *Proceedings of conference on "Enhancing the durability of lumber and engineered wood products"*, February 11-13, Kissimmee, Orlando.
- MITANI, A., BARBOUTIS, I. 2014. Color changes and dimensional stability in fir wood (*Abies Borissi-regis* Mattf.) Modified by heat treatment, *International Journal of Engineering Inventions* e-ISSN: 2278-7461, p-ISSN: 2319-6491 Volume 4, Issue 3, PP: 26-32.
- MITSUI, K., TAKADA, H., SUGIYAMA, M., 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(6): 601-605.
- MITSUI, K., MURATA, A., KOHARA, M., TSUCHIKAWA, S. 2003. Colour modification of wood by light-irradiation and heat treatment. In: *Abstracts of the First European Conference on Wood Modification*, Belgium.
- MITSUI, K., MURATA, A., TOLVAI, L. 2004. Changes in the properties of light irradiated wood with heat treatment: Part 3. Monitoring by DRIFT spectroscopy. *Holz Roh-Werkst.* 62(3):164-168.

- MONTEOLIVA, S., SENISTERRA, G., MARLATS, R. 2005. Variation of wood density and fibre length in six willow clones (*Salix* spp.). *IAWA J.*, 26: 197-202.
- MULLINS, E. J., MCKNIGHT, T. S. (EDS) 1981. Canadian Woods: Their Properties and Uses, 3rd edn. *University of Toronto Press*, Toronto, Ontario, Canada.
- NAVI, P., GIRARDET, F. 2000. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood. *Holzforschung* 54, 287-293.
- NAVI, P., HEGER, F. 2004. Combined densification and thermo-hydrmechanical processing of wood. *MRS Bulletin* 29, 332-336.
- NIEMZ, P. 1993. *Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe*. DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co. 243 s.
- NUOPPONEN, M., VUORINEN, T., JAMSA, S., VIITANIEMI, P. 2004. Thermal modifications in softwood studied by FTIR and UV resonance Raman spectroscopy. *J Wood Chem Technol* 24(1):13-26.
- NYRUD, A., BRINGLIMARK, T. 2010. Is interior wood use psychologically beneficial? A review of psychological responses toward wood. *Wood Fiber Sci* 42(2):202-218.
- PANSHIN, A. J., DE ZEEUW, C. 1980. *Textbook of Wood Technology*, 4th edn. McGraw-Hill, New York.
- PATZELT, M., EMSENHUBER, G., STINGL, R. 2003. Colour measurement as means of quality control of thermally treated wood. *The European Conference on Wood Modification*, Gent, Belgium. 213-218.
- PÉTRISSANS, M., GÉRADIN, P., EL-BAKALI, I. A SERAJ, M. 2003. Wettability of heat-treated wood. *Holzforschung*. 57(3), 301-307.
- POPOVIĆ, Z., TODOROVIĆ, N., GAVRILOVIĆ, D. 2008. Čvrstoća na pritisak i tvrdoća termički modificiranog drveta hrasta kitnjaka. *Prerada drveta* Br. 21-22.
- POŽGAJ, A. A KOL. 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, a. s. 485 s.
- RADEMACHER, P., PAŘIL, P., BAAR, J., ČERMÁK, P., ROUSEK, R., MEIER, D., KOCH, G., SCHMITT, U. 2015 Improvement of wood properties due to impregnation of wood with renewable liquids from different process residues of native origin. *COST-Action Report FP 1407*, Koper, Slovenia, 26.-27. Aug. 2015.
- RAPP, A., SAILER, M. 2000. Heat treatment in Germany. *Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe"*, Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- RAPP, A. 2001. Review on heat treatments of wood, *COST ACTION E22-Environmental optimisation of wood protection, Proceedings of Special Seminar in Antibes*, France.
- RAUTKARI, L., HILL, C. A. S., CURLING, S., JALALUDIN, Z., ORMONDROYD, G. 2013. What is the role of the accessibility of wood hydroxyl groups in controlling moisture content? *Journal of Materials Science* 48(18):6352-6356.

- RAZAK, W., IZYAN, K., ROZIELA, H., OTHMAN, S., AMINUDDIN, M., & AFFENDY, H. 2011. Effects of Hot Oil Treatment on Colour and Chemical Changes in year-old Cultivated Acacia hybrid. *Journal of Tropical Forest Science (JTFS)*, 23(1), 42-50.
- REINIATI, I. 2009. *Chemical, physical, and viscoelastic properties of hotpressed hybrid poplar*. Master Thesis. Washington State University, School of Chemical Engineering and Bioengineering. Pullman, United States of America. 133p
- REINPRECHT, L. 1998. *Ochrana dřeva a kompozitov*. TU v Zvoleně. 240 s.
- REINPRECHT, L. 2008. *Ochrana dreva*. 1. vyd. Zvolen: Vydateľstvo technickej univerzity vo Zvolene, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.
- RÉTFALVI, T., HOFMANN, T., ALBERT, L., NIEMZ, P. 2009. The environmental chemical features of the waste water originated from the thermal treatment of wood. *Wood Res. Slovakia* 54(4):13–22.
- RIEMENSCHNEIDER, D. E., NETZER, D. A., BERGUSON, B. 1996A. Intensive culture of hybrid poplars: what's new in Minnesota. In: Stokes, B. J., ed. *Proceedings, 1st conference*, Minnesota. In: University: 53–58. Stokes, B. J., ed. *Proceedings, 1st conference*, Short Rotation Woody Crops Operations Working Group; 1996 September 23–25; Paducah, KY. Auburn, AL: Auburn.
- RIEMENSCHNEIDER, D. E., STELZER, H. E., FOSTER, G. S. 1996B. Quantitative genetics of poplars and poplar hybrids. In: *Biology of populus and its implications for management and conservation*. Press, National Research Council Canada: 159–181. Part I, Chap. 7. Ottawa, ON: NRC Research.
- ROWELL, M. R., ELLIS, W. D. 1978. Determination of dimensional stabilization of wood using the water-soak method. *Wood and Fiber* 10(2), 104-111, 1978.
- ROWELL, M. R., LANGE, S., MCSWEENEY, J., DAVIS, M. 2002. Modification of wood fiber using steam, In: *Proceedings The 6th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*, Vol. 2, Portland, Oregon, USA.
- ROWELL, R. M. 2005. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Ed. R. M. Rowell. Florida: CRC Press. Pages 487.
- RUTYER, H. P. 1989. European patent Appl. No. 89–203170.9.
- RYPÁČEK, V. 1957. *Biologie dřevokazných hub*. Praha: Československá akademie věd. 209 s.
- SAILER, M., RAPP, A., LEITHOFF, H. 2000. Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment, In: *International Research Group Wood Pre*, Section 4-Processes, N° IRG/WP 00–40162.
- SALCA, E-A., HIZIROGLU, S. 2014. Evaluation of hardness and surface quality of different wood species as function of heat treatment, *Materials & Design*, Volume 62, Page 416 DOI: 10.1016/j.matdes.2014.05.029.
- SANDBERG, D. NAVI, P., 2011. *Thermo-hydro-mechanical Processing of Wood*. Lausanne, EPFL Press, 360 s. ISBN 978-2-940222-41-1, 249-286.

- SANDBERG, D., KUTNAR, A. 2016. Thermally modified timber: recent developments in Europe and North America, *Wood and Fiber Science*, 48 (2015 Convention, Special Issue), 2016, pp. 28-39.
- SANTOS, J. A. 2000. Mechanical behaviour of eucalyptus wood modified by heat, *Wood Science and Technology* 34, 39-43. DOI: 10.1007/s002260050006.
- SATOSHI, F., FUMIHITO, A., YASUTOSHI, S. 2008. The simultaneous treatment of compression drying and deformation fixation in the compression processing of wood. *Forest Products Journal* 58, 82.
- SEBORG, R., MILLET, M., STAMM, A., 1945. Heat-stabilized compressed wood. *Stay-pack. Mech. Eng.* 67:25-31.
- SEBORG, R., TARKOW, H., STAMM, A. 1953. Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood. *J. For. Prod. Res. Soc.* 3(9):59-67.
- SEHLSTEDT-PERSSON, M. 2003. Colour responses to heat treatment of extractives and sap from pine and spruce. *8th International IUFRO Wood Drying Conference*, Brasov, Romania, 459-464.
- SHAFIZADEH, F., CHIN, P. P. S. 1977. Thermal Deterioration of Wood. *ACS Symposium Series*: 57-81.
- SHAMS, M. I., YANO, H., ENDOU, K. 2004. Compressive deformation of wood impregnated with low molecular weight phenol formaldehyde (PF) resin I: Effects of pressing pressure and pressure holding. *Journal of Wood Science* 50, 337-342.
- SHAMS, M. I., KAGEMORI, N., YANO, H. 2006. Compressive deformation of wood impregnated with low molecular weight phenol formaldehyde (PF) resin IV: Species dependency. *Journal of Wood Science* 52, 179-183.
- SHI, J. L., KOCAEFE, D., ZHANG, J. 2007. Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using thermowood process. *Holz Roh Werkst* 65(4):255-259.
- SIVONEN, H., MAUNU, S. L., SUNDHOLM, F., JAMSA, S., VIITANIEMI, P. 2002. Magnetic resonance studies of thermally modified wood. *Holzforschung* 56(6):648-654.
- SRINIVAS, K., PANDEY, K. K. 2012. Effect of heat treatment on color changes, dimensional stability, and mechanical properties of wood, *Journal of Wood Chemistry and Technology* 32(4), 304-316, DOI: 10.1080/02773813.2012.674170.
- STAMM, A. J. a HANSEN, L. A. 1937. Minimizing wood shrinkage and swelling. Effect of heating in various gases. *Industrial and engineering chemistry.* 29(7), 831-833.
- STAMM, A. J., BURR, H., KLINE, A. 1946. Stay-wood-A heat stabilized wood. *Ind. Eng. Chem.* 38(6):630-634.
- STAMM, A. J. 1956. Thermal degradation of wood and cellulose. *Journal of industrial and engineering chemistry* 48(5):413-417.

- STAMM A. J., BAECHLER, R. H. 1960. Decay resistance and dimensional stability of five modified woods. *Forest Products Journal* 10, 22-26.
- SUNDQUIST, B., MORÉN, T. 2002. The influence of wood polymers and extractives on wood colour induced by hydrothermal treatment. *Holz Roh-Werkst* 60(5):375-376.
- SUNDQUIST, B. 2004. *Colour changes and acid formation in wood during heating*. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. Skelleftea, Sweden. 154p.
- SVATOŇ, J. 2000. *Ochrana dřeva*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. 203 s. ISBN 80-7157-435-x.
- SYRJÄNEN, T., JÄMSÄ, S., VIITANIEMI, P. 2000. Heat treatment of wood in Finland. *Proceedings of Seminar "Production and development of heat treated wood in Europe"*, Nov. 2000, Helsinki, Stockholm, Oslo.
- SYRJÄNEN, T., KANGAS, E. 2000. Heat-treated timber in Finland, In: *International Research Group Wood Pre, Section 4-Processes*, N° IRG/WP 00-40158.
- ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L. 1999. *Stavba dřeva: cvičení*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 129 s. ISBN 80-7157-400-7.
- 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.
- TJEERDSMA, B., BOONSTRA, M., MILITZ, H. 1998A. Thermal modification of non-durable wood species. Part 2. Improved wood properties of thermally treated wood. *International Research Group on Wood Pre.*, Document no. IRG/WP 98-40124.
- TJEERDSMA, B., MILITZ, H. 2005. Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. *Eur J Wood Prod* 63(2):102-111.
- TJEERDSMA, B., STEVENS, M., MILITZ, H. 2000. Durability aspects of hydrothermal treated wood. *International Research Group on Wood Preservation*, Document no. IRG/WP 00-4.
- TRÁVNÍK, A., 2005. *Technologické operace výroby nábytku*. MZLU Brno 178 s. ISBN 80-7157-865-7.
- TUONG, V. M., LI, J. 2010. Effect of heat treatment on the change in colour and dimensional stability of acacia hybrid wood, *BioResources* 5(2), 1257-1267. DOI: 10.15376/biores. 5. 2. 1257-1267.
- UGOLEV, V. N. 1982. *Drevesinovedenije s osnovami lesnovo tovarovedenija*. Moskva, 382 s.
- UGOLEV, V. N. 1986. *Drevesinovedenije s osnovami lesnovo tovarovedenija*. Moskva, 365 s.

- UNSAL, O., CANDAN, Z. 2007. Effects of press pressure and temperature on the moisture content, vertical density profile and janka hardness of pine wood panels. In: *Proceedings of 10th International IUFRO Division – 5, Wood Drying Conference*, August 26-30, 2007, Orono, Maine, USA.
- UNSAL, O., CANDAN, Z. 2008. Moisture content, vertical density profile and janka hardness of thermally compressed pine wood panels as a function of press pressure and temperature. *Drying Technol.* 26, 1165-1169. <http://dx.doi.org/10.1080/07373930802266306>.
- UNSAL, O., KARTAL, S. N., CANDAN, Z., ARANGO, R. A., CLAUSEN, C. A., GREEN, F. 2009. Decay and termite resistance, water absorption and swelling of thermally compressed wood panels. *Int. Biodeter. Biodegr.* 63(5), 548-552. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.02.001>.
- UNSAL, O., CANDAN, Z., KORKUT, S. 2011A. Wettability and roughness characteristics of modified wood boards using a hot-press. *Ind. Crop. Prod.* 34(3), 1455-1457. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.04.024>.
- UNSAL, O., CANDAN, Z., BUYUKSARI, U.; KORKUT, S.; CHANG, Y. S., YEO, H. 2011B: Effect of thermal compression treatment on the surface hardness, vertical density profile, thickness swelling of eucalyptus wood boards by hotpressing. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 39(2), 148-155. <http://dx.doi.org/10.5658/WOOD.2011.39.2.148>.
- UNSAL, O., CANDAN, Z., KORKUT, S., 2011c. Selected physical, mechanical, and drying properties of thermally modified poplar wood boards, *8th International Conference "Wood Science and Engineering in the Third Millennium" (ICWSE 2011)*, November 3-5, 2011 "TRANSILVANIA" University, Brasov, Romania.
- VAN ACKER, J., DEFOIRDT, N., DE BOEVER, L., VAN DEN BULCKE, J. 2015. European planted poplar as sustainable resource for multipurpose end uses, *Proceedings InWood2015: Inovations in wood materials and processes Brno*, Czech republic, pp. 153-155.
- VERNOIS, M. 2001. Heat treatment of wood in France – State of the art. In: *Review on heat treatments of wood, Proceedings of the special seminar of COST Action E22*, Antibes, France.
- VERNOIS, M. 2004. *Menz Holz: une première unité industrielle de traitement oléothermique*. CTBA Info, 104, 25-27.
- VIITANEN, H., JAMSA, S., PAAJANEN, L., NURMI, A., VIITANIEMI, P. 1994. The effect of heat treatment on the properties of spruce – a preliminary report. *International Research group on Wood Preservation*. Document No. IRG/WP 94-40032.
- VIITANEN, H., METSÄ-KORTELAJNEN, S., LAASKO, T. 2006. Resistance of pine and spruce heartwood against decay – The effect of wood chemical composition and coating with water-borne wood oil product (Doc. No. IRG/WP 06-10597). *International Research Group on Wood Preservation*.

- VIITANIEMI, P., JÄMSÄ, S., VIITANEN, H. 1997. *Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products*, United States Patent N° 5678324 (US005678324).
- VIITANIEMI, P. 1997A. Decay-resistant wood created in a heating process. *Industrial Horizons*. Espoo. VTT's Communications. P. 22–23.
- VIITANIEMI, P. 1997B. Thermowood-Modified wood for improved performance. In: *Trätekt Rapport No. P 9709084. Proceedings of the 4th Eurowood Symposium "Wood-The Ecological Material"*. Stockholm, Sweden, 22–23 September 1997. Stockholm: Trätekt. P. 67–69.
- VIITANIEMI, P., JÄMSÄ, S., EK, P. 2006. *Method of treating a piece of wood at an elevated temperature*. Patent no. CA 2598499 A1.
- VOBOLIS, J., ALBREKTAS, D. 2014. Research into sorption and mechanical properties of natural and modified birch wood, *Drewno*, Vol. 57, No. 191, DOI: 10.12841/wood.1644-3985.064.04.
- VYPĚSTUJ SI LES [online] [cit. 2015-07-15]. Available at: <http://www.vypestujbiles.cz/japonsky-topol/co-je-japonsky-topol/>.
- WANG, J. Y., ZHAO, G. J., IIDA, I., 2000. Effect of oxidation on heat fixation of compressed wood of China fir. *Forestry Studies in China*, 2 (1), 73-79.
- WANG, J., COOPER, P. A., 2004. Vertical density profiles in thermally compressed balsam fir wood. *Forest Prod. J.* 55 (5), 65-68.
- WANG, J., COOPER, P. A., 2005. Effect of grain orientation and surface wetting on vertical density profiles of thermally compressed fir and spruce. *Holz Roh. Werkst.* 63, 397-402. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-005-0034-3>.
- WANG, Y., CHEN, Z., FAN, Y. 2015. Influence of Thermal Modification on performance of Plantation Poplar Wood, *Proceedings International Conference on Applied Science and Engineering Innovation (ASEI 2015)*, China, ISBN: 978-94-62520-94-3, DOI:10.2991/asei-15.2015.298.
- WEGER, J. 2011. Výmladkové plantáže topolů a vrb. *Biom.cz* [online]. 2011-01-05 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vymladkove-plantaze-topolu-a-vrb>>. ISSN: 1801-2655.
- WEGER A KOL. 2015 [online] [cit. 2015-07-15]. *VUKOZ*, Available at: <http://www.vukoz.cz/index.php/cs/rychle-rostouci-dreviny/zajimavosti>.
- WEIGL, M., MÜLLER, U., WIMMER, R., HANSMANN, C. 2012. Ammonia vs. Thermally modified timber-comparison of physical and mechanical properties. *Eur J Wood Prod* 70(1–3): 233–239.
- WEILAND, J. J., GUYONNET, R. 1997. Retifiziertes Holz. 16. Verdichteter Holzbau in Europa. Motivation, Erfahrung, Entwicklung. *Dreiländer Holztagung*. 10. Joanneum Research Fachtagung. 2–5 November 1997.
- WEILAND, J. J., GUYONNET, R. 2003. Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy. *Holz Roh-Werkst* 61(3): 216–220.

- WELZBACHER, C. R., RAPP, A. O., HALLER, P., WEHSENER, J. 2005. Biological and mechanical properties of densified and thermally modified Norway spruce. In *The second European conference on wood modification: "Wood modification: processes, properties and commercialisation"*. Gottingen, Germany. (Eds H Militz, CAS Hill) pp. 20-27.
- WELZBACHER, C. R., RAPP, A. O. 2007. Durability of thermally modified timber from industrial-scale processes in different use classes: Results from laboratory and field tests. *Wood Mater. Sci. Eng.* 2(1):4-14.
- WESTIN, M., RAPP, A. O., NILSSON, T. 2004. Durability of pine modified by 9 different methods. *International Research Group on Wood Protection*, Document No. IRG/WP/04-40288.
- WILLIAMS, D. 1998. *Machining, Laminating, Fastener Withdrawal and Finishing Properties of Hybrid Poplar*. Forintek Canada Corporation, Quebec, Canada.
- WOLCOTT, M. P., SHUTLER, E. L. 2003. Temperature and moisture influence on compression – recovery behaviour of wood. *Wood Fiber Sci* 35(4):540-551.
- PLATOWOOD [online] [cit. 2016-02-15] Dostupné z: http://www.platowood.nl/wp-content/uploads/2015/08/Platowood_uniek-proces.jpg.
- WU, G. F., LANG, Q., QU, P., JIANG, Y. F., PU, J. 2010. Effect of chemical modification and hot-press drying on poplar wood, *BioResources* 5(4), 2581-2590.
- YANO, H. 2001. Potential strength for resin-impregnated compressed wood. *Journal of Materials Science Letters* 20, 1127-1129.
- YILDIZ, Ü. C., YILDIZ, S., GEZER, E. D., 2005. Mechanical properties and decay resistance of wood-polymer composites prepared from fast growing species in Turkey. *Bioresour. Technol.* 96, 1003-1011.
- YOUNGQUIST, J. A., SPELTER, H. 1990. Aspen wood products utilization: impact of the Lake States composites industry. *In Proceedings, Aspen Symposium 89*. USDA, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, St. Paul, MN. NC-GTR-140. pp. 91-102.

Seznam obrázků

Obr. 1	Rozlehlá plantáž hybridu topolů v Itálii (foto autor)	9
Obr. 2	Schéma procesu tepelné úpravy dřeva ThermoWood (Reinprecht 2008)	13
Obr. 3	Nerezový reaktor pro hydrotermolýzu dřeva (PlatoWood)	14
Obr. 4	Názorné zobrazení změn složek dřeva pod vlivem teploty bez ohledu na čas (Sandberg a Navi 2011)	17
Obr. 5	Změna struktury jarních tracheid vlivem tepelné modifikace; vlevo před a vpravo po modifikaci (Boonstra a Tjeerdsma 2006)	18
Obr. 6	Ztráta hmotnosti vlivem tepelné modifikace v závislosti na času úpravy pro různé teploty (Esteves et al. 2008a)	20
Obr. 7	Prodeje materiálu ThermoWood od roku 2001 do 2015 (Finská Asociace ThermoWood, statistika produkce 2016)	23
Obr. 8	Roční výmladky rychle rostoucího japonského topolu (foto autor)	24
Obr. 9	Fotografie makro (a) a mikrostruktury (b-d) dřeva topolu (Populus maximowitzii). Podélný a příčný řez zobrazuje obrázek makrostruktury (a). Mikrostruktura je zobrazena na příčném (b) a podélném (c) řezu. Obrázek (d) ukazuje 3D sken elektronovým mikroskopem (Balatinecz et al. 2014)	27
Obr. 10	Fotografie mikroskopické struktury dřeva referenčního vzorku hybridu topolu (vlevo), modifikovaných vzorků procesem VTC (zhuštěno ze 4 mm na 2 mm; ve středu a ze 6 mm na 2 mm; vpravo) (Horníček et al. 2015)	30
Obr. 11	Fotografie mikroskopické struktury dřeva hybridu topolu nemodifikovaného (a) a dřeva modifikovaného impregnační látkou PMMA. Šipky indikují nespojení PMMA se dřevem (1) a nevyplněné cévy (2) (Koubaa et al. 2012)	31
Obr. 12	Situace na místě odběru po rozřezání soustředěných vyselktovaných stromů (foto autor)	33
Obr. 13	Odkorněná polovina výřezu po vysušení s označenými budoucími segmenty (foto autor)	34

Obr. 14	Vyřezané segmenty z poloviny výřezu (foto autor)	35
Obr. 15	Hrubé výřezy vymanipulované ze segmentů (foto autor)	35
Obr. 16	Schematicky znázorněný postup výroby vzorků od stromu až po exemplární případ konkrétního zkušební tělíska	36
Obr. 17	Režim tepelné modifikace skupiny 2 – teplota 160 °C, čas 2 hodiny	37
Obr. 18	Režim tepelné modifikace skupiny 3 – teplota 160 °C, čas 4 hodiny	37
Obr. 19	Režim tepelné modifikace skupiny 4 – teplota 200 °C, čas 2 hodiny	38
Obr. 20	Režim tepelné modifikace skupiny 5 – teplota 200 °C, čas 4 hodiny	38
Obr. 21	Schéma vybavení a zapojení komory na tepelnou úpravu dřeva (foto autor)	39
Obr. 22	Základní grafické rozhraní ovládacího software během procesu tepelné modifikace (foto autor)	39
Obr. 23	Hrubé přířezy narovnané do hrání v komoře po tepelné modifikaci (foto autor)	41
Obr. 24	Vzorky připravené pro zkoušku ve statickém ohybu (foto autor)	41
Obr. 25	Souhrnný sloupcový graf zobrazující hmotnostní úbytky vlivem tepelné modifikace u jednotlivých skupin vzorků	51
Obr. 26	Souhrnný sloupcový graf zobrazující hustotu při 0% vlhkosti u jednotlivých skupin vzorků	52
Obr. 27	Souhrnný sloupcový graf zobrazující rovnovážnou vlhkost při rozdílných podmínkách prostředí u jednotlivých skupin vzorků	54
Obr. 28	Souhrnný sloupcový graf bobtnání v objemu vzorků ve všech šesti cyklech	56
Obr. 29	Souhrnný spojnicový graf reprezentující změnu objemu vzorků při jednotlivých cyklech	57

Obr. 30	Souhrnný sloupcový graf účinnosti omezení bobtnání v objemu vzorků čtvrté a páté skupiny během šesti cyklů	58
Obr. 31	Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty sesychání v objemu	59
Obr. 32	Souhrnný spojnicový graf znázorňující změnu objemu vzorků v průběhu testu sesychání	60
Obr. 33	Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty koeficientu účinnosti omezení sesychání v objemu	61
Obr. 34	Souhrnný sloupcový graf průměrných hodnot úbytku hmotnosti v důsledku vyluhování v šesti cyklech máčení	61
Obr. 35	Souhrnný spojnicový graf zobrazující reálný hodnotový vývoj průměrných úbytků hmotnosti vlivem vyluhování při šesti cyklech máčení a sušení	62
Obr. 36	Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty pevnosti vzorků ve statickém ohybu	64
Obr. 37	Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty modulu pružnosti vzorků ve statickém ohybu	65
Obr. 38	Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty pevnosti vzorků v tlaku podél vláken	66
Obr. 39	Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty modulu pružnosti vzorků v tlaku podél vláken	67
Obr. 40	Souhrnný sloupcový graf zobrazující průměrné hodnoty vlhkosti vzorků při vyjmutí z agresivního prostředí s mycéliem	68
Obr. 41	Souhrnný sloupcový graf s hodnotami průměrného hmotnostního úbytku vzorků	69
Obr. 42	Fotografie z testu rovnovážné vlhkosti dřeva a sesychání v prostředí s 99% vlhkostí vzduchu; vzorky umístěné na perforované porcelánové podložce ve skleněném eksikátoru s destilovanou vodou (foto autor)	74
Obr. 43	Fotografie z testu bobtnání a ztráty hmotnosti vlivem vyluhování při namočení vzorků v destilované vodě (foto autor)	78

-
- Obr. 44** Fotografie situace při měření pevnosti ve statickém tříbodém ohybu na univerzálním zkušebním stroji ZwickZ050 s extenzometrem pro snímání deformací (foto autor) 80
- Obr. 45** Fotografie porušených a deformovaných vzorků po provedení testu pevnosti ve směru vláken (foto autor) 81
- Obr. 46** Fotografie zástupců všech pěti sad vzorků v Petriho miskách na konci testu odolnosti vůči dřevokazné houbě (foto autor) 82

Seznam tabulek

Tab. 1	Popisná statistika naměřených výsledků pro ztrátu hmotnosti vlivem tepelné modifikace	51
Tab. 2	Popisná statistika hustoty při 0% vlhkosti	52
Tab. 3	Průměrné hodnoty hustoty v dobách měření	53
Tab. 4	Popisná statistika rovnovážné vlhkosti testovaných vzorků při 65% vlhkosti prostředí a 20°C	54
Tab. 5	Popisná statistika rovnovážné vlhkosti testovaných vzorků při 99% vlhkosti prostředí a 20°C	54
Tab. 6	Průměrné hodnoty hustot sad vzorků při minimální a maximální vlhkosti včetně jejich vlhkosti	55
Tab. 7	Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky bobtnání v objemu v jednotlivých cyklech	55
Tab. 8	Průměrné hodnoty účinnosti omezení bobtnání v objemu a jejich směrodatné odchylky při jednotlivých cyklech	57
Tab. 9	Průměrné hodnoty hustoty v době měření	58
Tab. 10	Popisná statistika sesychání v objemu testovaných vzorků	59
Tab. 11	Popisná statistika účinnosti omezení sesychání v objemu testovaných vzorků	60
Tab. 12	Průměrné hodnoty úbytku hmotnosti vlivem vyluhování po jednotlivých cyklech a jejich směrodatné odchylky	62
Tab. 13	Průměrné hodnoty hustoty a vlhkosti vzorků v době měření	63
Tab. 14	Popisná statistika meze pevnosti ve statickém ohybu testovaných vzorků	64
Tab. 15	Popisná statistika modulu pružnosti ve statickém ohybu testovaných vzorků	65
Tab. 16	Průměrné hodnoty hustoty a vlhkosti vzorků v době měření	65
Tab. 17	Popisná statistika meze pevnosti v tlaku podél vláken testovaných vzorků	66

Tab. 18	Popisná statistika modulu pružnosti v tlaku podél vláken testovaných vzorků	67
Tab. 19	Popisná statistika vlhkosti vzorků v době vyjmutí z prostředí s mycéliem	68
Tab. 20	Popisná statistika hmotnostního úbytku vzorků po působení houby⁶⁹	
Tab. 21	Průměrné hodnoty výsledků všech provedených experimentů; HÚ Δm_1 - hmotnostní úbytek vlivem modifikace, ρ_0 - hustota při 0% vlhkosti, RVD_{65%} - rovnovážná vlhkost dřeva v prostředí s vlhkostí 65 %, RVD_{99%} - rovnovážná vlhkost dřeva v prostředí s vlhkostí 99 %, αV_{\max} - maximální bobtnání v objemu při prvním cyklu máčení, ÚOB_{max} - maximální účinnost omezení bobtnání v objemu při prvním cyklu máčení, βV - sesychání v objemu, ÚOS - účinnost omezení sesychání v objemu, HÚ $\Delta m_{2,\max}$ - maximální hmotnostní úbytek vlivem vyluhování po šestém cyklu máčení, HÚ $\Delta m_{3,\max}$ - maximální hmotnostní úbytek vlivem degradace dřevokazné houby, σ_{ohyb} - pevnost ve statickém ohybu, MP_{ohyb} - modul pružnosti ve statickém ohybu, σ_{tlak} - pevnost v tlaku podél vláken, MP_{tlak} - modul pružnosti v tlaku podél vláken	70