

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI TERMICKY
MODIFIKOVANÉHO DŘEVA

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**VYBRANÉ FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI
TERMICKY MODIFIKOVANÉHO DŘEVA**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:

Dřevařství

Pracoviště (katedra/ústav):

Katedra základního zpracování dřeva

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Praha 2017

Dušan ŠVEC

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Dušan Švec

Dřevařství

Název práce

Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Název anglicky

Selected physical and mechanical properties of thermally modified wood

Cíle práce

Cílem práce je sesumářizovat poznatky o vlivu termické modifikace na fyzikálně – mechanické vlastnosti různých druhů termicky modifikovaných dřevin.

Metodika

1. Úvod

2. Analýza problematiky

- vliv stupně termické modifikace na změny fyzikálních – mechanických vlastností různých druhů termicky modifikovaných dřevin.

3. Přínosy a doporučení

4. Závěr

Doporučený rozsah práce

70

Klíčová slova

stupně termické modifikace, modifikované dřevo

Doporučené zdroje informací

Kačík, F., Veřková, V., Šmida, P., Nasswetterová, A., Kačíková, D., and Reinprecht, L. (2012). "Release of terpenes from fir wood during its long-term use and in thermal treatment," *Molecules* 17(8), 9990-9999. DOI: 10.3390/molecules17089990

Korkut, S., and Akgül, M. (2007). "Effect of drying temperature on surface roughness of oak (*Quercus petraea* ssp. *iberica* (Steven ex Bieb) Krassiln) veneer," *Building and environment* 42(5), 1931-1939. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.04.010

Niema, P., Hofmann, T., and Rétfalvi, T. (2010). "Investigation of chemical changes in the structure of thermally modified wood," *Maderas. Ciencia y Tecnología* 12(2), 69-78. DOI: 10.4067/s0718-221x2010000200002

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Mílan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2016

doc. Ing. Mílan Gaff, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 20. 04. 2017

Prohlášení

"Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci, na téma Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby."

V Praze dne: 20.4.2016

Dušan Švec

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi byli při zpracování bakalářské práci nápomocni. Zejména pak děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Milanovi Gaffovi, PhD. za jeho ochotu, pochopení a pomoc při řešení problémů spojených s touto prací.

Abstrakt ve státním jazyce

Autor: Dušan Švec

Název práce: Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.

Bakalářská práce se zabývá vybranými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi termicky modifikovaného dřeva. Zabývá se problematikou vybraných metod modifikací a jejich vlivem na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti. Dřevo je anizotropní materiál, proto je třeba brát v úvahu orientaci namáhaného tělesa. Vlastnosti dřeva jsou do velké míry ovlivněny různými faktory (především druhem dřeviny, vlhkostí vzorku) a je tedy nutno k nim také přihlížet. Zdroje byly vyhledány z dostupných literárních zdrojů, odborných článků a časopisů a na internetových stránkách.

Klíčová slova: Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti, modifikace dřeva, pevnost dřeva, tvrdost dřeva

Abstrakt v cizím jazyce

Author: Dušan Švec

Title of the thesis: Selected physical and mechanical properties of thermally modified wood.

This thesis deals with selected physical and mechanical properties of thermally modified wood. It deals with issues of selected methods and their modifications vlyvem on selected physical and mechanical properties. Wood is anisotropic material, therefore it is necessary to take into account the orientation of the stressed body. Wood properties are largely influenced by various factors (in particular wood species, moisture sample) and it is therefore necessary to take account of them as well. Resources were retrieved from the available literature, papers and magazines and on websites.

Keywords: Selected physical and mechanical properties, modification of wood, wood strength, wood stiffness.

Obsah

Prohlášení.....	4
Poděkování.....	5
Obsah	7
Seznam ilustrací	9
Seznam tabulek	10
Seznam zkratk a značek	11
Slovník termínů.....	12
1 Úvod.....	13
2 Cíl práce	15
3 Analýza literárních poznatků k předmětné problematice	16
3.1 Vlastnosti dřeva	16
3.1.1 Anizotropie dřeva.....	16
3.1.2 Pórovitost dřeva	16
3.1.3 Hygroskopicita.....	16
3.1.4 Nehomogenita	17
3.2 Fyzikální vlastnosti dřeva.....	17
3.2.1 Vlastnosti určující vnější vzhled dřeva	18
3.2.2 Barva dřeva	18
3.2.3 Vlhkostní vlastnosti dřeva.....	18
3.2.4 Hustota dřeva	19
3.2.5 Tepelné vlastnosti dřeva	20
3.2.6 Elektrofyzikální vlastnosti dřeva	21
3.2.7 Akustické vlastnosti dřeva	22
3.2.8 Povrchové a optické vlastnosti dřeva.....	23
3.2.9 Sesychání dřeva	23
3.3 Mechanické vlastnosti dřeva	25
3.3.1 Mechanické namáhání	27
3.3.2 Pružnost dřeva.....	27
3.3.3 Moduly pružnosti	29
3.3.4 Pevnost dřeva	30
3.3.5 Plastičnost dřeva	36
3.3.6 Houževnatost dřeva.....	37

3.3.7	Tvrдость dřeva	37
3.3.8	Štípatelnost dřeva.....	38
3.3.9	Opotřebovatelnost dřeva	39
4	Modifikované dřvo	40
4.1	Tepelně modifikované dřvo	40
4.1.1	Vlastnosti tepelně upraveného dřeva	41
4.2	Mechanická modifikace – lisování.....	43
4.3	Chemická modifikace dřeva	45
4.4	Enzymatické modifikace dřeva	45
5	ThermoWood.....	46
5.1	Charakteristické vlastnosti pro produkt ThermoWood	46
5.2	Výrobní proces ThermoWood.....	47
5.3	Principy výroby	48
5.4	Princip technologie úpravy prostřednictvím atmosféry vzduchu	49
5.5	Princip technologie úpravy prostřednictvím vodní páry	50
5.6	Princip technologie úpravy v prostředí inertních plynů	51
5.7	Princip technologie úpravy v olejích.....	51
6	Metodika práce.....	52
6.1	Materiál a jeho příprava.....	52
6.2	Klimatizace vzorků.....	54
6.3	Termická úprava vzorků.....	54
6.4	Metody měření.....	57
6.4.1	Barevná změna.....	57
6.4.2	Tvrдость podle Brinella	58
6.4.3	Zpracování výsledků v softwaru Statistica	60
6.5	Vyhodnocení experimentálních získaných dat	61
6.5.1	Zpracování a vyhodnocení dat	61
6.5.2	Statické zpracování dat	61
6.5.3	Výsledky a diskuze	61
7	Závěr.....	74
8	Seznam literatury a použitých zdrojů	76
9	Přílohy	78

Seznam ilustrací

Obr. 1	Anizotropní model vlastností dřeva - modul pružnosti.....	26
Obr. 2	Pracovní diagram podle Matoviče (1993).....	28
Obr. 3	Pracovní diagramy pevnosti v tlaku napříč vláken Matovič (1993).	32
Obr. 4	Schéma výrobní technologie ThermoWood. ThermoWood Handbook (2003).....	49
Obr. 5	Zkušební tělesa termicky modifikovaného dřeva při rozdílných teplotách u dřeviny: A) Meranti, B) Merbau (Teploty 20°C, 160°C, 180°C, 210°C)....	53
Obr. 6	Zkušební těleso pro hodnocení barevných změn a měření podle Brinella	54
Obr. 7	Teplotní postup modifikace vzorku (Meranti 160°C, Meranti 180°C, Meranti 210°C)	55
Obr. 8	Teplotní postup modifikace vzorku (Merbau 160°C, Merbau 180°C).....	56
Obr. 9	Grafické znázornění metody CIE L*a*b* www.dba.med.sc.edu	58
Obr. 10	Grafické znázornění změny souřadnice L* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti	64
Obr. 11	Grafické znázornění změny souřadnice a* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti	64
Obr. 12	Grafické znázornění změny souřadnice b* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti	65
Obr. 13	Grafické znázornění celkové změny barvy ΔE v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti	65
Obr. 14	Grafické znázornění změny souřadnice L* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau	69
Obr. 15	Grafické znázornění změny souřadnice a* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau	69
Obr. 16	Grafické znázornění změny souřadnice b* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau	70
Obr. 17	Grafické znázornění změny celkové změny barvy ΔE v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau	70
Obr. 18	Srovnání tepelného zpracování tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Meranti (Shorea) a Merbau (Intsia).....	73
Obr. 19	Srovnání sledovaného faktoru při použití Duncanovo testu na hodnotách tvrdosti podle Brinella	73

Seznam tabulek

Tab. 1	Parametry termické úpravy zkušebních těles Meranti	55
Tab. 2	Parametry termické úpravy zkušebních těles Merbau	56
Tab. 3	Kritéria pro vyhodnocení celkové změny barvy ΔE^*	57
Tab. 4	Parametry tvrdosti podle Brinella	58
Tab. 5	Průměrné hodnoty pro dřevinu Meranti	61
Tab. 6	Statistické hodnocení vlivu faktorů na hodnoty změny barvy pro dřevinu Meranti	62
Tab. 7	Srovnání jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu pro dřevinu Meranti	63
Tab. 8	Změna souřadnice barevného prostoru L^* , a^* a b^* a celková změna barevného prostoru ΔE^* v průběhu termické modifikace vzorků	66
Tab. 9	Průměrné hodnoty dřeviny Merbau	66
Tab. 10	Statistické hodnocení vlivu faktorů na hodnoty změny barvy pro dřevinu Merbau	67
Tab. 11	Srovnání jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu pro dřevinu Merbau	68
Tab. 12	Změna souřadnice barevného prostoru L^* , a^* a b^* a celková změna barevného prostoru ΔE^* v průběhu termické modifikace vzorků	71
Tab. 13	Průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella	71
Tab. 14	Statistické hodnocení vlivu faktorů tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Meranti	72
Tab. 15	Statistické hodnocení vlivu faktorů tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Merbau	72

Seznam zkratk a značek

BNV	bod nasycení vláken
ρ_w	hustota dřeva [kg/m ³]
w	vlhkost dřeva [%]
m_1	hmotnost zkušebního tělesa ve vlhkém stavu [g]
m_0	hmotnost zkušebního tělesa ve vysušeném stavu [g]
β	sesychání dřeva [%]
K_β	koeficient sesychání
E	modul pružnosti
σ_u	napětí na mezi úměrnosti [MPa]
ε_u	poměrná deformace na mezi úměrnosti [MPa]
σ_p	mez pevnosti [MPa]
σ_c	tlaková pevnost dřeva ve směru vláken [MPa]
σ_{max}	pevnost dřeva v ohybu [MPa]
F_u	síla působící na mezi úměrnosti [N]
Δ_{ul}	absolutní celková pružná deformace ve směru silového působení [m]
Δ_y	průhyb tělesa při zatížení [mm]
ΔE^*	celková změna barvy, Euklidova vzdálenost odchylek dvou barev
$\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$	rozdíly mezi referenčními hodnotami a hodnotami získanými po termické úpravě vzorků
CIE L*, a*, b*	základní barevný prostor pro správu barev
H_{BW}	tvrdost podle Brinella [MPa]
H_{BW12}	tvrdost podle Brinella na obsah vlhkosti 12% [MPa]

Slovník termínů

Dřevo je zahrnováno mezi obnovitelné zdroje energie, jako jeden z druhů biomasy. Je to snadno dostupný přírodní materiál, který lidé široce využívají po celou dobu své historie.

Lignin je důležitá stavební složka dřeva zabezpečující dřevnatění jeho buněčných stěn, po celulóze je druhou nejčastější organickou sloučeninou na Zemi, tvoří 25 % rostlinné biomasy.

Celulóza je hlavní stavební látkou rostlinných primárních buněčných stěn a spolu s ligninem a hemicelulózami se podílí na stavbě sekundárních buněčných stěn; celulóza je nejrozšířenějším biopolymerem na zemském povrchu.

ThermoWood je nejvíce využívanou technologií tepelné modifikace dřeva, ze které vychází produkt ThermoWood.

Modifikované dřevo je dřevo se záměrně změněnou strukturou a cíleně zlepšenými vybranými vlastnostmi, jako je termická odolnost, odolnost vůči vodě, rozměrová stabilita, barevná stabilita, pevnost, tvrdost apod.

Tvrdost dřeva jedná se o vlastnost vyjadřující schopnost dřeva klást odpor vniknutí jiného tělesa, což ovlivňuje jeho opracovatelnost při řezání, hoblování, frézování a loupání.

Pevnost dřeva je dána odporem tělesa proti síle působící z vnějšku, která má vyvolat trvalé porušení.

1 Úvod

Dřevo je materiál používaný pro různé aplikace již po tisíce let a v poslední době zažívá po jistém útlumu opět jakousi renesanci. Tento materiál má mnohé vynikající vlastnosti, jako jsou dobrá pevnost v poměru ke hmotnosti, dobré izolační vlastnosti, estetický vzhled atd. Má však také řadu nevýhod, které samozřejmě plynou z toho, že se jedná o přírodní materiál vznikající v podmínkách, kde na něj působí nejrůznější vlivy. Patří sem rozměrové změny v reakci na změnu atmosférických podmínek, citlivost na napadení biologickými činiteli a změny vzhledu při působení venkovního prostředí (zvětrávání). Všechny tyto vlastnosti omezují konečné použití dřeva.

To je hlavním důvodem, proč se lidé snaží dřevo upravit (modifikovat) tak, aby omezili, popřípadě úplně odstranili tyto negativní vlastnosti dřeva, a to mohlo být využito pro širší spektrum aplikací. V posledních letech je rovněž snaha o větší a také efektivnější využívání obnovitelných surovin. Právě dřevo by po určitých úpravách (modifikacích) nabízelo vhodnou náhradu, nebo alespoň částečnou, v aplikacích, kde byly dosud využívány neobnovitelné zdroje.

Lidé se o jisté modifikace dřeva snaží již odedávna. Například použití tepla (opalování) pro dosažení zlepšení odolnosti dřeva a změny tvrdosti povrchu jsou známé již po tisíce let. Na akademické úrovni jsou modifikace dřeva předmětem studií již přes 50 let, avšak komerčně významný rozvoj nastal poměrně nedávno. Protože se jedná o přírodní surovinu, jednotlivé studie tohoto materiálu se rozcházejí v mnoha názorech a jinak tomu není ani u studií modifikací dřeva. Častou snahou je provádění modifikací dřeva na jeho molekulární úrovni, tedy působením přímo na jeho chemické složky. Patří sem však rovněž modifikace, které nezahrnují změnu chemických složek dřeva.

Modifikace dřeva znamená změnu materiálu překonávající nebo zlepšující jeden nebo více jeho nedostatků. Cílem této změny může být zlepšení odolnosti proti hnilobě, zlepšení rozměrové stability, snížení sorpce vody, redukce rozsahu a rychlosti zvětrávání atd. Patří sem také úpravy povrchu podkladu. Takováto modifikace není omezena pouze chemickou vazbou na povrchu, ale může zahrnovat působení chemických látek, biologických činitelů (enzymů) nebo jiných činitelů (elektromagnetická radiace atd.).

Dřevo je jedním z nejdéle využívaných materiálů na světě. Již v dobách našich prapředků je lidé využívali ke stavbě obydlí, vyráběli si z něj pracovní nástroje.

Následovalo využívání dřeva jako zdroje energie a výroba papíru. Dřevo patří mezi obnovitelné zdroje, přispívá ke snižování podílu oxidu uhličitého v atmosféře, neboť při svém růstu tento plyn spotřebovává.

V současné době patří dřevo ke stále hojně využívaným materiálům, odolalo konkurenci umělých materiálů. Soudobé generace se postupně vrací k přírodě, a proto i dřevo zažívá obrodu. Tento všestranně používaný materiál má řadu předností a stejně tak i některé nedostatky. Obojí vyplývá z jeho vlastností, které lze jen částečně měnit, neboť, jak již bylo řečeno, se jedná o přírodní materiál.

Dřevo je už od dávných dob nejvšestrannějším a nejrozšířenějším materiálem, který člověk používá. I přes neobyčejný úspěch vědy a techniky na úseku výroby materiálů a plastů pro průmysl stavební, báňský, zemědělský i každodenní život dřevo bylo a nadále zůstává nejvyhledávanějším materiálem. Postupné prohlubování poznatků o vnitřní struktuře, chemickém složení, fyzikálních a mechanických vlastnostech vyvolává i intenzivní rozvoj techniky a technologií jeho zpracování a mnohostrannosti jeho využívání Požgaj (1993). Dřevo je materiál s rozdílnými vlastnostmi. Rozpětí biologických, chemických, fyzikálně-mechanických, technologických vlastností a přirozeně také vlastností struktury a vzhledu dřeva je extrémně velké. Pro většinu účelů použití je v zásadě vybíráno správné dřevo, neboť řemesla i průmysl k tomu mají nashromážděny dostatečné zkušenosti Wagenführ (2002). Dřevo oceňujeme nejen kvůli mnohostrannosti jeho technických vlastností a tomu, že je trvale k dispozici, ale především kvůli jeho estetickému působení. Život se dřevem, zejména radost z kresby a barvy se ve stoupající míře stává lidem potřebou Wagenführ (2002).

2 Cíl práce

Bakalářská práce se týká vybraných fyzikálních a mechanických vlastností termicky modifikovaného dřeva. Cílem práce je zesummarizovat poznatky o vlivu termické modifikace na vybraných fyzikálních a mechanických vlastnostech exotických druhů termicky modifikovaných dřevin, a to dřevin Meranti (*Shorea*) a Merbau (*Intsia*).

3 Analýza literárních poznatků k předmětné problematice

3.1 Vlastnosti dřeva

Fyzikální a mechanické vlastnosti ovlivňují strukturu dřeva, z tohoto důvodu se v následující části budeme tímto tématem zabývat.

Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva jsou předurčeny základními charakteristikami dřeva, jako jsou anizotropie, pórovitost, hygroskopicita a nehomogenita. Tyto charakteristiky jsou výsledkem chemické a anatomické stavby dřeva.

3.1.1 Anizotropie dřeva

Anizotropie dřeva je dána orientací základních chemických stavebních sloučenin a vazbami mezi nimi. Dřevo tak nemá stejné vlastnosti v různých směrech – transversálním, radiálním a tangenciálním. Vlastnosti dřeva se odvíjejí nejen od směru, ale i od orientace Reinprecht (2008).

3.1.2 Pórovitost dřeva

Porézní materiál jako je dřevo se vyznačuje tím, že objem pórů je často vyšší než objem buněčných stěn. Póry vytvářejí průchodný celistvý systém, který obsahuje tekutinu, např. vodu. Pórovitost vyplývá z optimalizace tvaru buňky, ze snahy maximálně snížit spotřebu stavebních látek ale současně nesnížit pevnost Reinprecht (2008).

3.1.3 Hygroskopicita

Je schopnost dřeva přijímat a odevzdávat vodu okolnímu vzduchu. Reprezentuje ji rovnovážná vlhkost dřeva. Dřevo bobtná při příjmu vázané vody po BNV a naopak při jejím uvolňování sesychá. Rozměry a tvary dřeva se tedy mění se změnou jeho vlhkosti v rozmezí od 0 % až po BNV. Rozměry běžně používaných druhů dřeva se přitom mění nejméně v podélném směru max. sesychání $\alpha_L = 0,15-0,65$ %, potom v radiálním směru max. sesychání $\alpha_R = 2,5-6,7$ % a nejvíc v tangenciálním směru max.

sesychání $\alpha_T = 8,3-14,7 \%$. Vlhkostní vlastnosti dřeva mají vliv i na jeho pevnost, trvanlivost a použití v praxi. Pevnost dřeva se převážně snižuje se zvýšenou vlhkostí v rozpětí 0 % až BNV. Časté a výrazné změny vlhkosti dřeva vedou k tvarovým deformacím a k tvorbě trhlin Reinprecht (2008).

3.1.4 Nehomogenita

Vzhledem k tomu, že se jedná o biologicky rostlý materiál, je dřevo řazeno mezi nehomogenní materiály. Nestejnorodost se projevuje na submikroskopické a mikroskopické úrovni (struktura zdřevnatělé buněčné stěny, stavba pletiv) a hlavně na makroskopické úrovni (jádro, běl, jarní a letní dřevo, dřeňové paprsky atd.). Přítomnost vad dřeva je také důkazem nehomogenity dřeva Horáček (2009).

3.2 Fyzikální vlastnosti dřeva

Jsou to vlastnosti, které lze pozorovat bez narušení chemického složení a celistvosti materiálu. Tyto vlastnosti zjišťujeme buď našimi smysly anebo přístoji či zkouškami bez porušení dřeva.

Podle ČSN 49 0000 se dělí do těchto skupin:

- vlastnosti určující vnější vzhled dřeva,
- vlastnosti určující vztah dřeva k vodě,
- vlastnosti určující hmotnost dřeva,
- vlastnosti určující vztah dřeva k teple,
- vlastnosti určující vztah dřeva ke zvuku,
- vlastnosti určující vztah dřeva k elektřině,
- propustnost dřeva Křupalová (1999).

Dále budou podrobněji popsány pouze ty vlastnosti, které jsou uváděny v literatuře v souvislosti s tepelnými úpravami dřeva.

3.2.1 Vlastnosti určující vnější vzhled dřeva

Do této kategorie patří barva, lesk, textura, vůně Křupalová (1999). Z uvedených vlastností je v souvislosti s tepelnými úpravami nejvýznamnější změna barvy dřeva.

3.2.2 Barva dřeva

Barva dřeva je pro určitý druh dřevin dost charakteristická a je tedy jedním z poznávacích znaků dřeva. Praktický význam má při výrobě nábytku, hudebních nástrojů, uměleckých děl, sportovních potřeb atd.

Zbarvení dřeva způsobují látky uložené v buněčných stěnách nebo buněčných dutinách. Jsou to barviva, trísloviny, pryskyřice a produkty jejich oxidování Křupalová (1999). Působením slunečního záření a vzduchu dřevo mění barvu. V našem případě jsou velké barevné změny způsobeny vlivem vysokých teplot.

3.2.3 Vlhkostní vlastnosti dřeva

Dřevo je materiál schopný vodu ze svého okolí přijímat i ji do něj navracet ve skupenství plynném i kapalném. Dřevo je schopno přijímat jakoukoli kapalinu, ale voda je pro dřevo, stromy nejdůležitější. Strom potřebuje vodu ke svému růstu a přežití, obsah vody v něm je vysoký Horáček (2009).

Vnitřní prostory buněk, buněčné stěny obsahují vodu, ale v různém poměru. Obsah vody se také odvíjí od velikosti stromu, jeho stáří, stanoviště a ročního období, ve kterém byl strom pokácen. Také hustota rozhoduje o vlhkosti dřeva, čím vyšší hustota, tedy i pevnost, tím nižší je obsah vody ve dřevě Josten a kol. (2010).

Po porážení má dřevo vlhkost přes 50 %, dle výše uvedených faktorů. Pro zpracování je nutno vlhkost snížit. Po předsušení dosahuje vlhkost 18-30 % a dřevo je nutno dále sušit, dosušuje se na rovnovážnou vlhkost, která odpovídá podmínkám, ve kterých se bude zpracovávat a využívat. Rovnovážnou vlhkostí rozumíme rovnováhu mezi klimatickými podmínkami a vlhkostí dřeva. Za daných klimatických podmínek (teplota a relativní vlhkost vzduchu) dřevo vodu nepřijímá ani nevypařuje. Toho lze v našich podmínkách dosáhnout jen velmi těžko Peschel a kol. (2002).

Po pokácení se obsah vody snižuje. Nejprve se snižuje podíl vody volné (kapilární), voda nacházející se ve vnitřním prostoru buněk. Po vyschnutí těchto prostor, je dosažen BNV. Po dosažení tohoto bodu se začíná vypařovat voda vázaná, voda obsažená v buněčných stěnách. BNV je určen hodnotou, která je závislá na typu dřeviny. Obvykle se pohybuje mezi 22 a 35 %.

Vysychání vázané vody je pomalejší, závisí na dřevině, tloušťce, vlhkosti a teplotě vzduchu a proces může trvat i několik let. Pokud se snižuje vlhkost dřeva, dochází i ke zmenšování objemu – sesychání. Pokud se naopak vlhkost zvyšuje, voda je přijímána do buněčných stěn, objem se zvětšuje – bobtnání. Jestliže je dosažen bod nasycení vláken, voda se začne ukládat i do vnitrobuněčných prostor, v tomto případě už se objem nemění.

Vyšší vlhkost nezpůsobuje jen zvětšení objemu, zvyšuje se hmotnost a dřevo je náchylnější k napadení dřevokaznými houbami. Vlhkost dřeva zásadním způsobem ovlivňuje jeho zpracovávání a musí být tak přesně známa. K tomu se využívají velmi přesné váhové zkoušky nebo elektrické vlhkoměry. Pro praxi je také důležité rozlišení velikosti sesychání a bobtnání ve všech třech směrech. Čím je hustota vyšší, tím dřevo více pracuje ve všech směrech – transversálním, radiálním i tangenciálním Josten a kol. (2010).

3.2.4 Hustota dřeva

Obecně hustota vyjadřuje hmotnost látky vztaženou k jejímu objemu. U dřeva je nutno rozlišit hustotu dřevní substance, která u všech dřevin dosahuje přibližně stejné hodnoty, a hustotu dřeva, která je již rozdílná. Hustota dřevní substance se vztahuje pouze na hmotu buněčných stěn bez dutin a je přibližně $1,56 \text{ g/cm}^3$. Oproti tomu hustota dřeva zahrnuje objem všech pórů ve dřevě a je tak závislá na stavbě dřeva (jarní a letní dřevo, přítomnost jádra, bělí, typy buněk) a na obsahu vody. S hustotou dřeva se proto vždy uvádí i jeho vlhkost. Nejpřesnější hustota dřeva by byla stanovena při nulové vlhkosti. V praxi se ovšem běžně určuje za vlhkosti 12–15 %. Výsledky hustoty v této vlhkosti jsou v rozmezí $0,15\text{--}1,35 \text{ g/cm}^3$. Obecně se ale hustota na vzduchu vyschlého dřeva pohybuje pod hodnotou $1,0 \text{ g/cm}^3$ a z toho vyplývá, že dřevo plave, neboť je lehčí než voda Josten a kol. (2010).

Podle vlhkosti lze pro praxi dřevo třídit do několika základních skupin:

- mokré dřevo (> 100%)- dřevo uložené dlouhodobě ve vodě,
- syrové dřevo čerstvě poraženého stromu (50- 100%),
- dřevo sušené dlouhodobě vzduchem v obyčejných podmínkách (15-20%),
- dřevo sušené ve vytápěných místnostech (8- 10%),
- absolutně suché dřevo sušené v sušárnách (0%) Škára(1996).

Pro výpočty je nadále využita pouze hustota dřeva.

Dřevinou s nejvyšší hustotou se udává dřevo gujaku o hustotě $\rho_w = 1363 \text{ kg/m}^3$. Naopak nejnižší hustotu má dřevo balzy $\rho_w = 130 \text{ kg/m}^3$. Průměrná hodnota hospodářsky nejvýznamnějších dřevin se pohybuje mezi $350\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ Šlezingerová et. al, (2009), Požgaj et al., (1997).

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} [\text{kg/m}^3] \quad (1)$$

Kde m_w je hmotnost dřeva dané vlhkosti, V_w je objem vlhkého dřeva (1). Dle platné normy ČSN 94 0108 se hustota dřeva v literatuře udává při vlhkosti 12 %. Pro možnosti porovnání výsledků různých výpočtů uvažujeme hustotu dřeva v absolutně suchém stavu. Vypočítá se jako podíl hmotnosti a objemu při nulové vlhkosti(2).

$$\rho_w = \frac{m_o}{V_o} [\text{kg/m}^3] \quad (2)$$

Kde m_o je hmotnost vysušeného dřeva, V_o je objem o nulové vlhkosti Požgaj et al., (1997).

3.2.5 Tepelné vlastnosti dřeva

Tepelné vlastnosti jsou stěžejní pro proces sušení dřeva. Je zásadní znát, kolik je třeba systému dřevo – voda dodat tepla, aby se ohřál na požadovanou teplotu. Současně se uplatňují údaje o teplotě v daném bodě tělesa v daném čase. Se změnami teploty tělesa dochází i ke změnám jeho objemu.

Při zvyšování teploty dřevěného tělesa se zvyšuje energie jeho molekul a dochází tak i ke zvětšování objemu celého tělesa. Tato teplotní roztažnost je definována podílem

změny daného rozměru a rozměru původního při lineární závislosti na teplotě. Koeficient roztažnosti vyjadřuje změnu délkové jednotky dřeva za ohřevu o 1°C.

Veličina měrné teplo vyjadřuje schopnost dřeva akumulovat teplo. Měrné teplo vyjadřuje, jaké množství tepla je nutné na ohřátí jednotkové hmotnosti dřeva o 1°K. Měrné teplo není závislé na druhu dřeva a jeho hustotě, ale na teplotě a vlhkosti dřeva.

V dřevěných materiálech dochází k přenosu tepla. Může k němu docházet třemi formami – vedením, prouděním nebo sáláním. Údaje o přenosu tepla ve dřevě jsou nutné pro hydrotermické úpravy dřeva, při stanovování sušících režimů a posuzování tepelně-izolačních vlastností dřeva. Proudění a sálání se na přenosu tepla dřevem podílejí jen minimálně. Přenos tepla ve dřevě se tak zjednodušeně popisuje jako vedení tepla Horáček (2009).

Pro pórovitost dřeva je tepelná vodivost dřeva poměrně malá, proto je dřevo dobrým tepelným izolantem. Pro vyjádření tepelné vodivosti je využívá koeficient tepelné vodivosti. Obecně platí, že s rostoucí hustotou roste i schopnost dřeva vést teplo. Tepelná vodivost je ovlivněna i vlhkostí, suché dřevo vede špatně, vlhké dřevo je naopak dobrým vodičem Josten a kol. (2010).

Dřevo má poměrně dobré tepelně-izolační vlastnosti. Krátce odolává teplotám nad 150°C, poté se může vznítit. I přesto, že je hořlavé, při požárech je často tvarově i pevnostně stabilnější než kovy nebo plasty Reinprecht (2008).

3.2.6 Elektrofyzikální vlastnosti dřeva

Pokud na dřevo působí střídavé elektromagnetické pole, získává specifické vlastnosti. Elektromagnetické pole je složeno z vlivu elektrického a magnetického pole. Vliv obou polí na dřevěný materiál je rozdílný. Vliv magnetického pole je minimální a pro praktické účely ho nemusíme brát vůbec v úvahu. Opakem je elektrické pole, jehož vliv na dřevo je zásadní. Na základě vzájemného spolupůsobení elektrického pole a dřeva je vznik elektrického proudu ve dřevě.

Jednou z významných schopností dřeva je schopnost polarizace, ke které dochází při působení vnějšího elektrického pole v celém rozsahu vlhkosti. Polarizace je možná díky změnám, ke kterým dochází v prostorovém uspořádání elektricky nabitých částic při působení vnějšího elektrického pole. Dielektrika (schopnost polarizace) je ovlivněna

frekvencí působícího elektrického pole, druhem dřeva, jeho hustotou, anatomickým směrem, teplotou a vlhkostí.

Další významnou elektrofyzikální vlastností dřeva je jednosměrná elektrická vodivost. Elektrický proud v dřevěném materiálu vzniká po připojení elektrod na protilehlé strany tělesa. Tato vlastnost je závislá na velikosti tělesa, na jeho délce a průřezu. Ve dřevě současně vzniká elektrický odpor, vyjádřený poměrem napětí a proudu v tělese, který je stejně jako vodivost závislý na uspořádání vláken, teplotě, vlhkosti dřeva a kontaminaci chemickými látkami. Se stoupající vlhkostí měrný odpor ve dřevě klesá a suché dřevo je tak velmi dobrým izolantem. V praxi se elektrický odpor ve dřevě uplatňuje při měření vlhkosti dřeva.

Izolační vlastnosti si dřevo zachovává pouze do určité intenzity působícího elektrického pole. Hranice této intenzity je nazývána elektrická pevnost. Po jejím dosažení se z izolantu stává vodič. Ztráta izolačních vlastností je ovlivněna druhem dřeviny, anatomickým směrem, vlhkostí a teplotou. Elektrickou pevnost lze zvyšovat impregnací, např. parafinem, oleji, pryskyřicemi apod. Horáček(2009).

3.2.7 Akustické vlastnosti dřeva

Dřevo je materiál s velmi dobrými akustickými vlastnostmi, proto se již staletí používá na výrobu hudebních nástrojů a je využíváno i pro zlepšení zvukových podmínek v divadlech, koncertních halách a sálech i v kinech. Zvuk, uspořádaný kmitavý pohyb molekul, je charakterizován vlnovou délkou, amplitudou vlnění, frekvencí a rychlostí šíření zvuku. Rychlost šíření zvuku závisí na použitém materiálu (vlastnosti hustota a modul pružnosti), dále závisí na vlhkosti a teplotě prostředí. Menší hustota a vyšší modul pružnosti způsobují vyšší rychlost šíření zvuku dřevem. Z toho vyplývá, že u dřeva je určující druh použitého dřeva a rozhodující vliv má i anizotropní charakter. Napříč vlákny se zvuk šíří třikrát pomaleji než ve směru vláken, v tomto směru je rychlost podobná jako u kovů. Rychlost šíření zvuku stoupá se snižující se vlhkostí dřeva.

Rezonance, odvozená vlastnost dřeva, je schopnost zesilovat zvuk bez zkreslení. Pro určení rezonance se používají metody vycházející z měření pružné a plastické charakteristiky dřeva při šíření pružných vln dřevem. Pro testování se používá materiál ve tvaru tyče a v něm se vyvolají příčné, podélné nebo torzní vibrace za působení vnějších periodických sil. Dřevo pak dosahuje frekvence kmitání, ta je ovlivněna

rozměry tělesa, hustou, pružností, vlhkostí, teplotou a tvarem kmitání. Rezonanční vlastnosti mají jehličnany, zejména pak smrk. Rozhodující je podíl letního a jarního dřeva v letokruhu, z čehož vyplývá, že významnou roli mají pěstební podmínky. Současně dřevo nesmí mít vady a záleží i na podmínkách a délce vysychání po pokácení. Dřevo lze také využívat jako zvukoizolační materiál. Například použitím korkových, heraklitových či dřevovláknitých desek do vícevrstevných stěn Horáček(2009).

3.2.8 Povrchové a optické vlastnosti dřeva

Mezi tyto vlastnosti řadíme barvu dřeva a jeho povrch.

Barva dřeva je ovlivněna schopností lidského oka vnímat spektrální složení odrážených světelných paprsků. Člověk vnímá pouze určitou část spektra vlnových délek a dřevo dokáže světelné paprsky některých vlnových délek odrážet a jiných pohlcovat. Barva je určena celulózu, hemicelulózu a ligninem, tedy hlavními chemickými složkami dřeva a dále zastoupením extraktivních látek. U nich je rozhodující jejich výraznost a barevnost, objem není rozhodující. Dřevo obsahuje v největší míře celulózu, která je bílá a je překryta doprovodnými látkami malého zastoupení. Barva dřeva se určuje na základě použití tří základních ukazatelů – tón, čistota a světlost Horáček(2009).

Povrch rozlišujeme vnitřní a vnější, obecně se jedná o část tělesa, která jej odděluje od okolního prostředí. Povrch dřeva je ovlivněn především anatomickou stavbou a způsobem opracování. Pro charakteristiku povrchu je důležitá jeho drsnost. Textura dřeva je odrazem makroskopické stavby dřeva – stavba, šířka a tvar letokruhů. Současně záleží na směru řezu.

3.2.9 Sesychání dřeva

Mění-li se vlhkost dřeva v rozsahu vody vázané, dřevo podléhá rozměrovým změnám – hygroexpanzi rozměrů. Snížení vlhkosti dřeva mokrého k mezi hygroscopicity (odpaření vody volné) nemá významný vliv na změnu rozměrů. Sesychání je lokalizováno v buněčné stěně, kde dochází k přiklizování fibrilární struktury, a tím se mění rozměry jednotlivých elementů a dřeva jako celku Horáček (1998).

Sesycháním nazýváme proces, při kterém dřevo zmenšuje svoje lineární rozměry, plochu nebo celkový objem, a to při ztrátě vázané vody v rozsahu MH – 0 %. Rozeznáváme sesychání lineární (v jednotlivých anatomických směrech – podélném, radiálním a tangenciálním), plošné (změna plochy tělesa) a objemové (změna objemu tělesa).

Sesychání dřeva od meze hygroskopicity do absolutně suchého stavu označujeme jako sesychání celkové (maximální). Sesychání dřeva v jakémkoliv menším intervalu nazýváme částečným sesycháním Gandelová et al. (1996).

Sesychání (β) se vyjadřuje podílem změny rozměru k původní hodnotě a uvádí se nejčastěji v % (3):

$$\beta_i = \frac{a_{iw1} - a_{iw2}}{a_{iw1}} \times 100 = \frac{d_{aiw}}{a_{iw1}} \times 100 \quad (\%) \quad (3)$$

kde: a- rozměr tělesa, jeho plocha nebo objem,
i – index udávající směr, plochu nebo objem,
 w_1 – vlhkost před sesycháním,
 w_2 – vlhkost po ukončení sesychání.

Pro praktické účely je vhodné znát procentuální změnu rozměrů, plochy nebo objemu, jestliže se vlhkost změní o 1 %. K tomu slouží koeficient sesychání K_{β} , který se vypočte ze vztahu(4) Gandelová et al. (1996).

$$K_{\beta i} = \frac{\beta_i}{w_1 - w_2} = \frac{\beta_i}{d_w} \quad (\%/1\%) \quad (4)$$

kde: β_i – sesychání v daném směru, ploše či objemu,
 w_1 – vlhkost před sesycháním,
 w_2 – vlhkost po skončení sesychání.

Na základě hodnot koeficientu objemového sesychání můžeme rozdělit dřeva do následujících skupin Horáček (1998). :

- Dřeva málo sesychavá - koeficient objemového sesychání je menší než 0,4: tis, vrba, olše, topol, kaštanovník, limba, akát.
- Dřeva středně sesychavá - koeficient objemového sesychání je 0,4-0,47: borovice, smrk, jedle, dub, jilm, javor, jasan, ořešák, osika.
- Dřeva hodně sesychavá - koeficient objemového sesychání je větší než 0,47: modřín, bříza, buk, habr, lípa.

3.3 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva jsou pevně dány schopností dřeva odporovat působení vnějších mechanických sil. Tyto síly mohou působit:

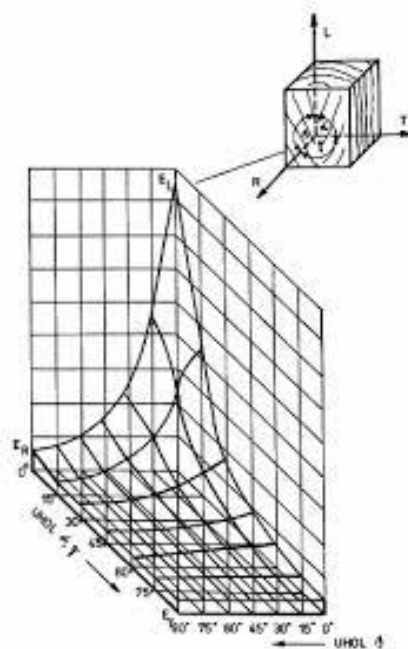
- staticky – mechanická síla plynule a pomalu narůstá,
- rázově – jednorázová síla působící maximální hodnotou,
- kmitavě – působící síla mění intenzitu a směr,
- trvale – dlouhodobé působení síly Pecina a Pecina (2007).

Mechanické vlastnosti třídíme do tří skupin:

- základní (pružnost, pevnost, plastičnost, houževnatost),
- odvozené (tvrdość, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení, odolnost proti únavovému zlomu),
- technologické (štípatelnost, opotřebovatelnost, impregnovatelnost).

Mechanické vlastnosti dřeva mají anizotropní charakter, který je dán orientací a uspořádáním molekul dřeva. Velikost a orientace mechanických vlastností v úrovni mikro i makrostruktury dřeva jsou dány orientací kovalentních a vodíkových vazeb. Významný rozdíl vlastností ve směru podélném a kolmém na vlákna je zapříčiněn základními mechanickými elementy dřeva, především jejich uspořádáním. Anizotropie mechanických vlastností dřeva je znázorněna v modelu (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), kdy je využito tří rovin pružné symetrie:

- transversální (RT),
- radiální (LR),
- tangenciální (LT) Horáček (2009).



Obr. 1 Anizotropní model vlastností dřeva - modul pružnosti

V kapitole následuje stručný popis jednotlivých mechanických vlastností dřeva. Zpočátku jsou uváděny vlastnosti důležité a určující při zpracovávání dřeva. Následují vlastnosti označované jako odvozené a technologické vlastnosti. Výčet těchto vlastností není ve všech publikacích věnujících se tématu vlastností dřeva stejný. Nejčastěji se sem řadí houževnatost, štípatelnost, opotřebovatelnost, ohýbatelnost, schopnost držet spojovací prostředky Horáček (2009). V některých publikacích nalezneme také vlastnosti jako přijímání nátěrových a impregnačních hmot nebo obrobitelnost Pecina a Pecina (2007). V této práci je využito členění vlastností dřeva dle Horáčka (2009). Do skupiny odvozených a technologických vlastností řadí zatížení, která zapříčiňují složité stavy napjatosti a nelze je tak jednoznačně zařadit k jiným vlastnostem. Obvykle se jedná o vlastnosti vyplývající z technologického procesu zpracování dřeva.

3.3.1 Mechanické namáhání

Děj, při kterém dochází ke vzájemnému působení mezi mechanickými silami dřevem, představuje mechanické namáhání dřeva. Tento děj způsobuje dočasné nebo trvalé změny tvaru tělesa. Podle fyzikální podstaty sil, které namáhání způsobují, lze rozlišit namáhání dřeva mechanické, vlhkostní, tepelné atd. Pro používání dřeva mají stěžejní vliv spolupůsobící zatížení mechanické a vlhkostní a čas, po který působí. Tyto faktory významně ovlivňují deformovatelnost dřeva při různých druzích namáhání. Základem reakcí na mechanické namáhání jsou vazby mezi chemickými složkami dřeva, anatomická stavba dřeva a geometrie tělesa Horáček (2009).

3.3.2 Pružnost dřeva

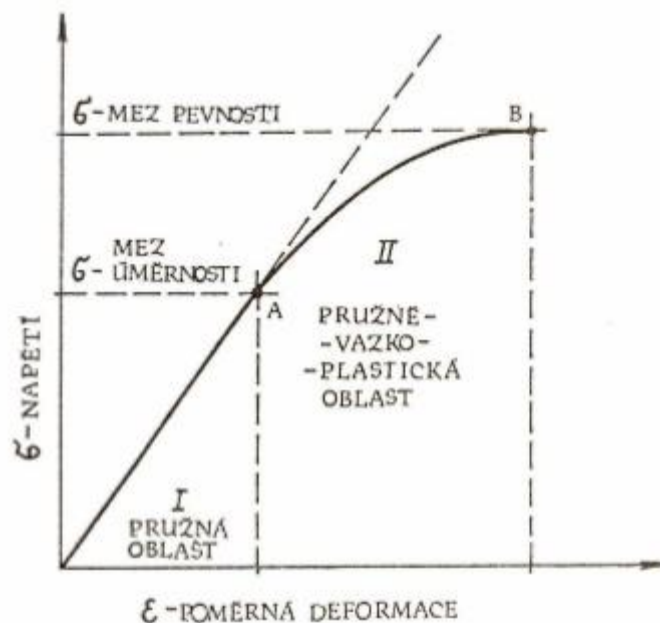
Pružnost je schopnost materiálu nabývat původního tvaru a rozměrů po předchozím působení vnější síly, která vyvolá deformaci. Pokud dojde k překročení hranice pružnosti, dochází u materiálu k poškození nebo dokonce k prasknutí. Pokud na dřevo působí deformační síly dlouhodobě, dochází k únavě dřevních vláken a jejich deformaci. U dřeva je pružnost významně ovlivněna přítomností suků a vad Josten a kol. (2010).

Pružnost je z hlediska konstrukčního použití dřeva jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností. Z fyzikálního hlediska je to takový stav, že změny vyvolané předchozím působením sil mezi vzdálenostmi atomů jsou návratné, takže po odstranění vnějších sil se atomy vrátí do svých rovnovážných vzdáleností tak, aby bylo dosaženo nejnižší potenciální energie Požgaj (1997).

Pružnost můžeme vyjádřit následujícími charakteristikami:

- Moduly pružnosti (E , G)
- Poissonovými čísly (μ)
- Mezi úměrností (σ_u)
- Pružnou deformací (ϵ_p)
- Energií pružné deformace (W_p)

Poslední tři jsou nejlépe patrné z obecného tvaru pracovního diagramu (viz Obrázek 2) Gandelová et al. (1996).



Obr. 2 Pracovní diagram podle Matoviče (1993)

Pracovní diagram je empirická křivka charakterizující vztah mezi napětím a deformací. Tento diagram můžeme rozdělit na dvě části, a to na lineární část po mez úměrnosti (σ_u) a nelineární část nad mezí úměrnosti po mez pevnosti (σ_p). Mez úměrnosti je definována jako takové napětí, do kterého v tělese vznikají pouze deformace pružné, případně pružné v čase, a napětí je v tělese rovnoměrně rozloženo. Po ukončení silového působení tyto deformace zcela zanikají a těleso se vrátí do původního stavu. Se vzrůstajícím napětím nad mezí úměrnosti deformace dále rostou, ale napětí v tělese není rozloženo rovnoměrně a deformační čára nabývá charakteru křivky.

Vzniklé deformace jsou plastické, nejsou přímo úměrné napětím a po ukončení působení vnější síly nezanikají. Napětí, při kterém nakonec dochází k porušení tělesa, je označováno jako mez pevnosti. Mez pevnosti je tedy nejvyšší hodnota napětí, kterou dřevo snese bez porušení celistvosti tělesa. Sklon přímky v pracovním diagramu mezi nulovou hodnotou napětí a napětím na mezi úměrnosti vyjadřuje poměr mezi napětím a deformací a je používán pro výpočet modulu pružnosti (5) Gandelová et al. (1996).

$$\operatorname{tg} \alpha = E = \frac{\sigma_u}{\varepsilon_u} \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

kde: E- modul pružnosti,

$\sigma_{\dot{u}}$ – napětí na mezi úměrnosti (MPa),

$\varepsilon_{\dot{u}}$ –poměrná deformace na mezi úměrnosti (MPa).

Zastoupení jednotlivých druhů deformací je různé a záleží na druhu mechanického namáhání, druhu dřeviny a na vlhkosti dřeva. Obecně ale platí, že nejvyšší podíl zaujímají vždy deformace pružné (55-90 %). Naopak nejmenší (do 5 %) deformace pružné v čase Gandelová ae al. (1996).

3.3.3 Moduly pružnosti

Moduly pružnosti lze zjistit pouze experimentálně, protože pro většinu materiálů dosud neexistují jejich teoreticky odvozené rovnice. Obvykle jsou tyto parametry zjišťovány na zkušebních strojích, kde je současně měřena deformace a působící silové zatížení.

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím větší napětí je potřebné na vyvolání deformací. Rozlišujeme moduly pružnosti při normálových namáháních (tah, tlak, ohyb) – Youngovy moduly pružnosti E_i a smykové moduly G_{ij} při namáháních tangenciálních (smyk a krut). Moduly pružnosti představují důležité materiálové konstanty při statických výpočtech dřevěných konstrukcí.

3.3.3.1 Modul pružnosti v tahu a tlaku

Modul pružnosti v tahu a tlaku je charakterizován podílem napětí a podélné deformace podle vztahu (6):

$$E = \frac{F_{\dot{u}} \cdot L}{S \cdot \Delta_{ul}} \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

kde: $F_{\dot{u}}$ - síla působící na mezi úměrnosti (N),

L– původní délka tělesa před silovým působením (m),

S–plocha, na kterou působí síla F (m^2).

Δ_{ul} – absolutní celková pružná deformace ve směru silového působení (m).

Průměrná hodnota modulu pružnosti pro dřevo v tlaku ve směru vláken se pro domácí dřeviny udává v rozpětí 10 000-15 000 MPa při průměrné absolutní vlhkosti 12 %. Napříč vláken je tato hodnota až 25krát menší, přičemž v radiálním směru je asi o 20-50% vyšší než v tangenciálním směru. Vzájemný poměr mezi jednotlivými směry lze stanovit $E_L:E_R:E_T = 20:2:1$

3.3.3.2 Modul pružnosti ve statickém ohybu

V ohybu se udává pouze modul pružnosti kolmo na vlákna a zkouší se prakticky jen v tangenciálním směru. Odvození modulu pružnosti v ohybu vychází z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem. Deformace při ohybu je definována jako poměr vzniklého průhybu nosníku a poloměru ohybu (7):

$$E_L = \frac{F \cdot l_o^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta_y} \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

kde: F- působící síla (N),

l_o – vzdálenost podpěr (mm),

b – šířka zkušního tělesa (mm),

h – výška zkušního tělesa (mm),

Δ_y – průhyb tělesa při zatížení (mm) Gandelová et al (1996).

3.3.4 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva charakterizuje odpor (odolnost) dřeva proti jeho trvalému porušení. Kvalitativně se pevnost vyjadřuje napětím, při kterém se poruší soudržnost tělesa – napětím na mezi pevnosti σ_p . S ohledem na nemožnost vypočítat teoretickou pevnost dřeva pro žádný způsob mechanického namáhání stanovuje se pevnost dřeva jako skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa. Jedinou výjimkou je pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, která je definována jako konvenční pevnost, protože zde konečného porušení tělesa nelze dosáhnout Gandelová et al. (1996).

Pevnost (odolnost) je dána odporem tělesa proti síle působící z vnějšku, která má vyvolat trvalé porušení. Při používání dřevěných materiálů má proto značný význam. Pevnost dřeva se liší dle druhu použité dřeviny, ale také u dřeva v rámci jednoho druhu nalezneme rozdíly. Pevnost je svázána s hustotou, obecně platí, že s přibývajícím hustotou stoupá pevnost. Pevnost bělí je nižší než pevnost jádra, sušší dřevo vykazuje větší pevnost než dřevo vlhčí, jemnoleté dřevo odolává vnější síle lépe než dřevo s širokými letokruhy, čím zralejší dřevo tím lepší pevnostní vlastnosti Josten a kol. (2010).

Kvantitativně se odolnost dřeva formuluje napětím, při kterém dojde k poničení tělesa. Přesný výpočet teoretické pevnosti dřeva pro jakýkoli způsob namáhání je nemožný, z tohoto důvodu se stanovuje pevnost dřeva jako skutečná pevnost dřeva. Údaje o pevnosti se vyjadřují na základě zkoušek, při kterých se měří skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa. U dřeva představuje výjimku pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, která je definována jako konvenční pevnost.

Při zkoušce pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken nelze porušení tělesa dosáhnout. Při tlaku nedochází k oddělování jednotlivých částí. Nastává pouze postupná deformace a zhušťuje se dřevní struktura Horáček (2009).

3.3.4.1 Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken

Tlaková pevnost dřeva ve směru vláken (σ_c) je z praktického hlediska velmi důležitou vlastností dřeva. Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken se vypočítá podle vztahu pro normálové napětí (8):

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{a \cdot b} \text{ (MPa)} \quad (8)$$

kde: F_{\max} – síla na mezi pevnosti (N),
a,b– příčné rozměry tělesa (mm),

Působením tlaku na těleso podél vláken dojde k deformaci projevující se zkrácením délky tělesa. Charakter deformace závisí na jakosti a stavbě dřeva. Důležitými činiteli jsou hustota a vlhkost dřeva.

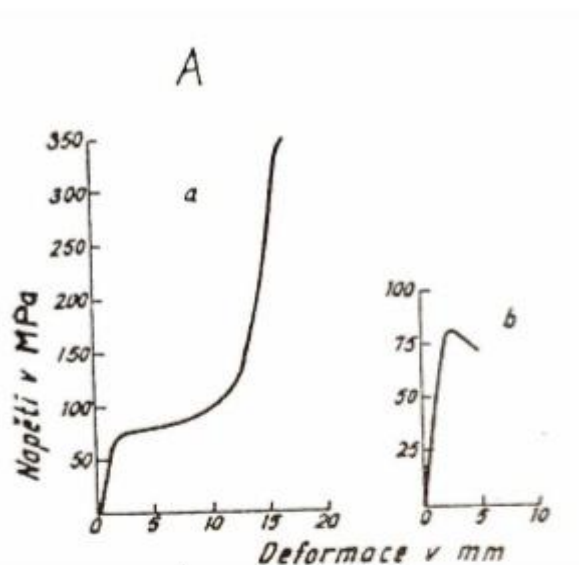
U dřeva suchého s vysokou hustotou a tedy i s vysokou pevností dochází zatížením k porušení dřeva ve formě smyku jedné části tělesa vzhledem k druhé po linii, která na tangenciální ploše probíhá pod úhlem 60° vzhledem k podélné ose tělesa. U dřeva vlhkého s nízkou hustotou a malou pevností dochází k otláčení vláken na čelních plochách a k vybočení stěn zatěžovaných těles.

Průměrná hodnota meze pevnosti dřeva v tlaku ve směru vláken při 12% vlhkosti je cca 50 MPa Gandelová et al. (1996).

3.3.4.2 Pevnost dřeva v tlaku napříč vláken

Na rozdíl od tlaku ve směru vláken nebývá v tomto případě dřevo porušeno oddělováním jednotlivých částí, ale dochází k postupné deformaci a zhušťování dřevní struktury v celém objemu. Pevnost v tlaku napříč vláken se zjišťuje graficky z pracovního diagramu.

Při působení tlaku napříč vláken jsou možné dva způsoby deformací dřeva – deformace jednofázová a třífázová (viz Obrázek 3).



Obr. 3 Pracovní diagramy pevnosti v tlaku napříč vláken Matovič (1993).

- a) Třífázová deformace
- b) Jednofázová deformace

Při jednofázové deformaci je na diagramu zřetelná lineární část (se vzrůstajícím napětím vzrůstá i deformace), která probíhá téměř do maximálního zatížení, při kterém dochází k porušení tělesa Matovič (1993).

Nad mezí úměrnosti dochází k postupnému porušování soudržnosti tělesa, což se projevuje na hranicích letokruhů. Ty se ohýbají, navzájem od sebe oddělují a dochází k rozvíjení plastické deformace tělesa Gandelová et al. (1996).

Třífázová křivka deformace dřeva je typická pro zatížení dřeva při tlaku napříč vláken v radiálním směru. První fáze deformace (lineární část křivky) je způsobena stlačováním jarního dřeva v letokruzích. Na konci této fáze je dosženo meze úměrnosti. Po ztrátě stability anatomických elementů začíná jejich stlačování. Tento proces probíhá působením stejného nebo jen málo vzrůstajícího napětí. Na pracovním diagramu představuje téměř vodorovnou nebo málo zakřivenou část křivky (druhá fáze). S postupnou deformací pevnějších elementů letního dřeva v letokruzích dochází k přechodu do třetí fáze deformace. Na pracovním diagramu je charakterizována lineární částí s ostrým stoupáním. Tato fáze probíhá při značném zatížení. Dochází ke zhušťování dřeva, ale v konečné fázi nedochází k úplnému porušení tělesa Matovič (1993).

Jelikož při působení tlaku napříč vláken nedochází ve většině případů k celkovému porušení tělesa, určuje se pevnost v tlaku z meze úměrnosti. Avšak s ohledem na to, že vlastní mez úměrnosti je obtížné určit, zjišťuje se v podstatě mez úměrnosti na základě stanovených kritérií. Tato stanovená mez úměrnosti je označována jako konvenční mez pevnosti ($\sigma_k = \sigma_u$).

Konvenční mez pevnosti při zatížení napříč vláken je pro všechny druhy dřeva průměrně desetkrát menší než mez pevnosti při tlaku ve směru vláken Gandlerová et al. (1996).

3.3.4.3 Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken

Mez pevnosti v tahu ve všech směrech se vypočítá podle vztahu pro mormálové napětí (9):

$$\sigma_t = \frac{F_{\max}}{a \cdot b} \text{ (MPa)} \quad (9)$$

kde: F_{\max} - síla na mezi pevnosti (N),
a,b– příčné rozměry tělesa (mm),

Tahová pevnost podél vláken (σ_t) je v porovnání s ostatními pevnostmi dřeva nejvyšší a její průměrná hodnota pro naše dřeviny se udává 120 MPa. Porušení tělesa při namáhání v tahu se projevuje roztrhnutím buněk dřeva v pracovní části tělesa. Vlákňitý nebo rozštěpený zlom vypovídá o vysoké pevnosti dřeva v tahu. Naopak hladký nebo schodovitý zlom signalizuje nízkou pevnost vzorku.

Při zatížení v tahu ve směru vláken se dřevo chová jako křehký materiál s malou deformací a zlomem bez viditelných předcházejících příznaků (plastických deformací) Požgaj (1997).

3.3.4.4 Pevnost dřeva v tahu napříč vláken

Na rozdíl od pevnosti v tahu podél vláken vykazuje pevnost v tahu napříč vláken jednu z nejmenších pevností vůbec. To je dáno orientací vazebných sil. Zatímco ve směru podél vláken se na tahové pevnosti podílejí především vazby kovalentní, ve směru napříč vláken působí vazby vodíkové a vazby Van der Waalsovy, které jsou řádově slabší. Průměrná tahová pevnost kolmo na vlákna se pohybuje v rozpětí od 1,5 do 5 MPa, proto bychom se při použití dřeva na nosné konstrukce měli tomuto způsobu zatížení vyhnout.

Mez pevnosti v tahu napříč vláken je větší v radiálním směru než v tangenciálním. Tato pevnost je u všech dřevin průměrně asi 1/20 pevnosti v tahu ve směru vláken Gandelová et al. (1996).

3.3.4.5 Pevnost dřeva v ohybu

Pevnost dřeva v ohybu (σ_{\max}) se vypočítá podle následujícího vztahu (10):

$$\sigma_{\max} = \frac{3 \cdot F \cdot l_o}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (\text{MPa}) \quad (10)$$

kde: F- působící síla (N),

l_o – vzdálenost mezi podpěrami (m),

h– výška nosníku (m).

Tento vztah předpokládá lineární průběh napětí až po mez pevnosti, je tedy určitým zjednodušením. Kdyby se vycházelo ze skutečného průběhu napětí ve dřevě během ohybu, byl by výpočet značně komplikovaný a pro praktické účely nepoužitelný Gandelová et al. (1996).

Pevnost dřeva v ohybu je jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností. U dřeva rozlišujeme dva způsoby pevnosti v ohybu s ohledem na průběh vláken, a to:

- pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa a síla působí napříč vláken v radiálním nebo tangenciálním směru,
- pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, kdy je příčný řez orientován ve směru působící síly nebo kolmo k působící síle.

Zpravidla se sleduje a používá pevnost dřeva v ohybu napříč vláken. Při zkoušení dřeva se orientují zkušební tělesa obvykle tak, aby zatížení působilo napříč vláken v tangenciálním směru (tangenciální ohyb). U listnatých dřevin je rozdíl hodnot mezi pevnosti dřeva při statickém ohybu pro radiální a tangenciální směr zanedbatelný. Pouze u jehličnatých dřev bylo zjištěno, že mez pevnosti v tangenciálním směru je o 10 až 12 % větší než v radiálním směru Gandelová et al. (1996).

Při zatížení tělesa vzniká v jeho horní části napětí v tlaku a ve spodní části napětí v tahu. Nedeformovatelná část ve středu tělesa bez normálového napětí se označuje jako neutrální osa. Vzhledem k tomu, že tlaková pevnost dřeva podél vláken je mnohem menší než tahová pevnost, začíná porušení tělesa při ohybu v tlakové zóně vybočováním vláken, což je ale málokdy pozorovatelné pouhým okem. Konečné porušení tělesa probíhá v tahové zóně, kdy po překročení meze pevnosti dojde nejdříve k odštěpení krajních vláken a potom k úplnému zlomení tělesa. Dřevo křehké, málo pevné má zlom téměř hladký. Houževnaté pevné dřevo má zlom vláknitý nebo třískovitý.

Průměrná mez pevnosti ve statickém ohybu (napříč vláken) je pro naše dřeviny 100 MPa. Pevnost v ohybu závisí mimo jiné i na rozměrech zatěžovaného tělesa. Štíhlostní poměr musí být minimálně 14 a vypočítá se ze vztahu (11):

$$\frac{l_o}{h} \geq 14 \quad (11)$$

kde: l_o – vzdálenost podpěr (mm),
 h – výška zkušební tělesa (mm).

Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, se prakticky nevyskytuje. Hodnoty meze pevnosti jsou v tomto případě velmi nízké, a proto se ani v literatuře s touto veličinou v podstatě neuvažuje Gandelová et al. (1996).

Dřevo má, jak z předpředcházejícího vyplynulo, poměrně vysokou ohybovou pevnost, a proto se často používá na konstrukční prvky namáhané ohybem (nosníky, nábytek) Matovič (1993).

3.3.5 Plastičnost dřeva

Trvalá změna tvaru tělesa bez zjevného poničení, ke které dojde při působení sil z vnějšku, označujeme jako plastičnost. Těleso se plasticky deformuje, nedochází ke zlomení. Odlišně se projevuje plastičnost při dlouhodobém a krátkodobém působení vnějších sil. Při krátkodobém působení síly se její vliv začíná projevovat až po překročení meze úměrnosti. Při dlouhodobém působení síly se plastická deformace uplatňuje od počátku zatížení a dřevo se v této situaci chová jako viskózně-pružný materiál. Celkově lze uvést, že plastičnost je tím větší, čím je větší plastická deformace aniž by došlo ke vzniku makroskopického zlomu dřeva. Údaje o plastičnosti dřeva jsou pouze orientační, vztah mezi napětím a deformací není lineární. Ve dřevě se napětí přenáší fibrilární strukturou buněčné stěny, jejíž základní složkou je celulóza tvořená ze 70 % krystalickým a z 30 % amorfním podílem. Již výše bylo zmíněno, že plastičnost přímo souvisí s časem a tím se zabývá obor zvaný reologie. Tento obor zavádí do mechaniky materiálů právě čas. Jedná se o rozměr, který je rozhodující pro plastičnost dřeva. Při delší době působení je deformace větší a naopak pevnost menší Horáček (2009).

3.3.6 Houževnatost dřeva

Houževnatost je vlastností dřeva, která je úzce spjata s jeho plastičností. Jedná se o mechanickou práci, která je spotřebována při vzniku plastické deformace. Dle typu zatížení se používá rozdělení statická a dynamická houževnatost.

Statickou houževnatost řadíme mezi mechanické vlastnosti dřeva, která určuje mechanickou energii spotřebovanou na vznik plastické deformace. Pokud je napětí malé a deformace zanedbatelná, označujeme materiál jako křehký. U dřeva je vznik plastické deformace poměrně energeticky náročný a plastická deformace je v některých případech značná (např. tlak napříč vláken). Dřevo z tohoto důvodu zařazujeme mezi materiály houževnaté.

Rázová houževnatost, někdy označovaná jako přerážecí práce, je dána schopností dřeva pohltit práci vykonanou rázovým ohybem. Rázová houževnatost udává schopnost dřeva odolávat jednorázovému zatížení a charakterizuje ji energie spotřebovaná na přeražení dřeva. Při určování této vlastnosti se používají přerážecí kladiva, např. Charpyho kladiva. Obvyklé je stanovování rázové houževnatosti pro ohyb napříč vláken v tangenciálním směru. U jehličnanů a listnáčů kruhovitě pórovitých, což jsou dřeviny s rozdílnou stavbou letokruhu, se rázová houževnatost stanovuje i pro směr radiální, ve kterém dosahuje hodnot o 25–50 % vyšších Horáček (2009).

3.3.7 Tvrdost dřeva

Tato vlastnost je stěžejním ukazatelem pro opracovatelnost dřeva i pro jeho opotřebovatelnost. Jedná se o vlastnost vyjadřující schopnost dřeva klást odpor vniknutí jiného tělesa, což ovlivňuje jeho opracovatelnost při řezání, hoblování, frézování a loupání, při činnostech, kdy se dřevo odírá. Tvrdé dřevo odolává vniknutí břitu dřevoobráběcího stroje a snižuje se tak jeho opracovatelnost. Tvrdost se liší u jednotlivých dřevin a závisí na struktuře dřevěných buněk a množství obsažené vody, a tudíž vyplývá z hustoty. Obecně platí, že zvyšující se hustota dřeva zvyšuje i jeho tvrdost, takže zvyšující se vlhkost tvrdost snižuje. Rozlišuje se statická a dynamická tvrdost.

V praxi se běžně používá rozdělení dřevin na měkké a tvrdé. Při obchodování se dřevinami se používá dělení do tříd, kdy je statická tvrdost stanovena číselnou hodnotou na základě zkušební metody podle Brinella. Při pokusu je kuličkou o průměru 1 cm

vtlačen do dřeva důlek konstantní silou při vlhkosti 12 % a zjišťuje se plocha vytlačeného důlku. Tvrdost se stanovuje kolmo na vlákna a podél nich. Na základě této metody se dřeviny dělí do následujících skupin:

- velmi měkké (lípa, topol, vrba, vejmutovka),
- měkké (smrk, jedle, olše, douglaska),
- středně tvrdé (modřín, limba),
- tvrdé (javor, dub, buk, jasan, jilm),
- velmi tvrdé (eben, palisandr, kvajak) Josten a kol. (2010).

Statickou tvrdost můžeme také určovat na základě Jankovy metody. Při ní dochází k zatlačování polokuličky s průměrem 11,28 mm do hloubky 5,64 mm na zkušební ploše 100 mm². Síla nutná k zatlačení polokuličky přímo vyjadřuje tvrdost.

Hodnoty statické tvrdosti podle Brinellovy i Jankovy metody říkají, že statická tvrdost je vyšší na příčné rovině než na podélné. U jehličnanů je rozdíl v hodnotách 40 % u listnáčů je rozdíl o 10 % nižší. Rozdíly ve statické tvrdosti na radiální a tangenciální ploše jsou zanedbatelné. Při zpracování výsledků statické čelní tvrdosti při 12% vlhkosti se dřevo dělí do 5 skupin:

- | | | |
|-----------------------|---------------|-------------------|
| • měkká dřeva | (< 40 MPa) | smrk, lípa, |
| • středně tvrdá dřeva | (41-80 MPa) | buk, dub, modřín, |
| • tvrdá dřeva | (81-100 MPa) | habr, akát, |
| • velmi tvrdá dřeva | (101-150 MPa) | zimostráz, |
| • super tvrdá dřeva | (< 150 MPa) | eben, kvajak. |

Při určování dynamické tvrdosti se také využívá metody s kuličkou. Tuto vlastnost charakterizuje potenciální energie kuličky padající volným pádem ze stanovené výšky. Zjišťuje se plocha otlaku, který kulička pádem vytvoří. Dynamická tvrdost přímo souvisí s vlhkostí Gandelová et al. (1996).

3.3.8 Štípatelnost dřeva

Štípaní dřeva je proces, při kterém dochází ke vnikání klínu do dřeva a následně k dělení dřeva na části. Při dělení působí současně tlak a ohyb, jedná se tak o složitější jev. Štípatelnost určujeme na základě síly, která je nutná k porušení celistvosti.

Štípatelnost se vyjadřuje jako odolnost proti štípaní, což znamená, že se jedná o odpor, který dřevo klade proti rozdělení. Údaje se zaznamenávají pro štípatelnost ve směru vláken v radiální a tangenciálním směru. Obecně platí, že listnaté stromy mají díky výrazně vyvinutým dřevným paprskům odolnost větší ve směru tangenciálním. U jehličnatých stromů je rozdíl štípatelnosti v radiálním a tangenciálním směru menší. Dřevo jehličnanů se štípe lépe. I u této vlastnosti je důležitá hodnota vlhkosti. Čím vlhčí dřevo, tím nižší hodnota štípatelnosti Horáček (2009).

3.3.9 Opotřebovatelnost dřeva

Opotřebovatelnost vyjadřuje odolnost dřev proti působení různých mechanických činitelů. Jedná se tedy o schopnost dřeva odolat na povrchu například tření. K opotřebování dochází obvykle dvěma případy:

- odírání dřeva působením tvrdých částic – typickým příkladem je písek působící na dřevěné podlahy nebo schodiště,
- odírání dřeva za působení nerovnosti kovových částic – kovové součásti třecích strojů (osy, ložiska).

Při testu opotřebovatelnosti dřeva tvrdými částicemi jsou v umělých podmínkách navozeny situace reálného procesu odírání. Při zkouškách se používají různé stroje, které brousí dřevo brusným papírem určité zrnitosti ve všech třech plochách dřeva. Míra opotřebovatelnosti je po ukončení testu vyjádřena rozdílem hmotnosti tělesa před a po zkoušce. Hodnoty se liší u různých druhů dřevin, rozdílných ploch stejné dřeviny. Záleží také na podmínkách stanoviště. Obecně platí, že vyšší opotřebovatelnost má dřevo v podélné rovině, dřevo s nižší hustotou a tvrdostí a dřevo s nižší vlhkostí.

Testy ukazující opotřebovatelnost dřeva při odírání kovovými částicemi se nejčastěji provádí působením otočného pouzdra z kalené oceli. Pouzdro působí určitou silou a určitými otáčkami a v tělese vytvoří rýhu. Její objem vyjadřuje míru opotřebení. Odolnější vůči takovému způsobu rozrušování povrchu dřeva je čelní plocha povrchu dřeva a dřevo tvrdší a hustší Horáček (2009).

4 Modifikované dřevo

Modifikované dřevo je dřevo se záměrně změněnou strukturou a cíleně zlepšenými vybranými vlastnostmi, jako je termická odolnost, odolnost vůči vodě, rozměrová stabilita, barevná stabilita, pevnost, tvrdost apod. Modifikování dřeva není produktem moderní doby, známky a pomyslné základy metod nalézáme již v pravěku a dávné historii. Na začátku 20. let 20. století se často modifikovalo biocidními látkami. Často byla využívána látka CCA, což je zkratka pro měď-chrom-arsen. Látka je škodlivá pro zdraví člověka i životní prostředí. Začátkem 70. let 20. století tyto faktory vyvinuly tlak na dřevaře a uživatele dřeva, aby hledali a do praxe zavedli vhodné ekologické alternativní metody na zvýšení trvanlivosti dřevařských výrobků.

Modifikované dřevo se stále dynamicky rozvíjí. Donedávna se používalo jen na speciální výrobky. Současná situace je taková, že se důkladně propracovaly nové technologie a modifikovanému dřevu se podařilo prosadit na trhu i přes překážky, jako jsou komplikované technologické procesy výroby nebo poměrně vysoké náklady na výrobu. V dnešní době máme na výběr hned z několika druhů modifikovaného dřeva, které dosahuje lepších nebo stejných vlastností jako exotické dřeviny. Modifikované dřevo je na úrovni nejdražších tropických dřevin, jako je např. teak. S procesem rozvoje výroby se ale očekává, že cena bude klesat Hill (2006), Reinprecht (2008).

Úlohou všech modifikačních metod je cíleně změnit strukturu dřeva, a to tak aby se zlepšily jeho vybrané vlastnosti. Konkrétně při mechanických modifikacích dřeva se mění jeho geometrická struktura případně i morfologická a anatomická struktura, přičemž se nezdá, že se zvyšuje i jeho hustota a tvrdost. Při chemických, termických a enzymatických modifikacích dřeva se mění v první řadě jeho molekulární a chemická struktura, s možnými změnami i jeho anatomické, morfologické a geometrické struktury, přičemž takto zušlechtnuté dřevo bývá zvýšeně trvanlivější a hydrofóbnější Reinprecht, Vidholová (2011).

4.1 Tepelně modifikované dřevo

Termická modifikace dřeva je záměrný technologický proces úpravy struktury dřeva vlivem regulovaného působení vysokých teplot na dřevo, s cílem zlepšení jeho odolnosti vůči vodě a biologickým škůdcům Reinprecht (2008).

Na jeho výrobu se používají netrvanlivé a méně trvanlivé druhy dřevin např. smrk, borovice, bříza, buk atd. V historii byl jedním z prvních, který už v roce 1915 poukázal, že efekt působení vysoké teploty na dřevo zlepšuje jeho fyzikální vlastnosti, vědec Tiemann Hill (2006). Procesy termické modifikace dřeva jsou patentem chráněné.

Významnější změny ve struktuře dřeva nastávají při působení teploty v intervalu 180 až 280°C, u teplot nižších než 140°C byly zaznamenány jen lehké změny a při teplotách nad 300°C docházelo k degradaci materiálu. Teploty působí po dobu 15 minut až 24 hodin Hill (2006).

Změny v molekulární struktuře dřeva a úbytek hmotnosti vlivem odpařování vody se projevují i ve změně vlastností jako je rozměrová stabilita, pevnost, hygroskopicitata apod. Typ a rozsah změn ve struktuře a vlastnostech termicky modifikovaného dřeva závisí na působící teplotě i na podmínkách prostředí (oxidační atmosféra, vakuum nebo podtlak). Dále také závisí na druhu dřeva a jeho vstupní vlhkosti. Už při teplotě sušení 110°C se dřevo stává rozměrově stabilnější. Vyšší teploty násobí tento efekt hlavně díky tvorbě nových chemických vazeb. Při hydrotermické úpravě působí na dřevo i voda. Také je možností technologie, kde na dřevo působí kromě tepla i olej, tento proces byl zaznamenán a vyvinut v Německu Hill (2006), Reinprecht (2008).

Tepelná úprava dřeva je zaměřena na:

- zvýšení biologické odolnosti,
- snížení rovnovážné vlhkosti,
- eliminaci rozměrových změn.

4.1.1 Vlastnosti tepelně upraveného dřeva

Pevnost tepelně upraveného dřeva je ve většině případů horší než původního dřeva. Známý fakt je, že vysoké teploty narušují hlavně hemicelulózy, a tím negativně narušují pevnostní vlastnosti. Pevnost dřeva se snižuje i podle toho, o jaké tepelně upravené dřevo se jedná a jakým procesem bylo vyrobeno. Dřevo po termické úpravě je křehčí a klesá i jeho ohybová a tahová pevnost v rozsahu 10 až 30 %. Na druhé straně tuhost tepelně upraveného dřeva zůstává buď beze změny, nebo se nepatrně zvyšuje.

Beze změny zůstává jeho povrchová tvrdost, případně tlaková pevnost. Pro tepelně upravené dřevo v zásadě platí, že ho není vhodné používat pro nosné prvky u dřevěných konstrukcí Reinprecht (2008).

Hygroskopicitata je velmi důležitá vlastnost tepelně upraveného dřeva, která ovlivňuje i jeho jiné vlastnosti hlavně rozměrovou stabilitu a odolnost vůči biologickým škůdcům. Dřevo upravené vysokými teplotami má menší hygroskopicitu v porovnání s rostlým dřevem Reinprecht (2008), Wang a Cooper (2005).

Při běžné interiérové teplotě $20 \pm 2^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti vzduchu $60 \pm 5\%$ je rovnovážná vlhkost dřeva 10 až 12,5 %, zatímco u tepelně upraveného dřeva vyrobeného procesem ThermoWood je podstatně nižší (3 až 5 %).

Odolnost vůči biologickým škůdcům závisí významně na procesu jeho výroby a na tom, kam je určeno. Ve většině případů se zlepšují jeho vlastnosti v porovnání s neupraveným dřevem. Odolává lépe houbám, což se nesmírně hodí například do parních saun. Odolává také hmyzu, což je vhodné pro využití u exteriérového nábytku, a mořským škůdcům, což je vhodné u vybavení lodí nebo přístavů.

Odolnost vůči abiotickým činitelům závisí na technologickém postupu výroby. U tmavších dřevin se vlivem UV záření, srážek, kyslíku a jiných atmosférických činitelů rychle mění jejich původní barva na šedou. Z uvedeného důvodu je nutné je povrchově ošetřit oleji nebo barvami. Naopak jejich nižší rovnovážná vlhkost a zvýšená rozměrová stabilita přispívají k dobré odolnosti vůči vzniku povrchových trhlin, a to i v případech kdy se povrchově neošetří.

Dřeviny původně méně trvanlivé nebo netrvanlivé se po termické úpravě stávají trvanlivé nebo velmi trvanlivé. Příkladem je tepelně upravené borovicové dřevo vyrobené ThermoWood procesem, jehož trvanlivost po úpravě teplotou 205°C je porovnatelná s trvanlivostí tisu Reinprecht (2008).

Podobně i dřevo upravené Plato procesem lépe odolává houbám v porovnání s neupravenými jehličnatými a listnatými dřevinami. Výrazné zlepšení bioodolnosti u tepelně upraveného dřeva se zjistilo hlavně vůči celulózovorným a ligninovorným druhům dřevokazných hub. Zlepšení odolnosti vůči plísním, dřevozbarvujícím houbám a houbám měkké hniloby není vždy jednoznačné. Tepelně upravené dřevo je dostatečně odolné vůči dřevokazným broukům, ale jejich odolnost vůči termitům může být i nižší než u neupraveného dřeva.

Technické vlastnosti jsou převážně dobré. Tepelně upravené dřevo se dobře lepí polyuretanovými a fenolformaldehydovými typy lepidel. Naopak spoje při použití PVAc disperzních lepidel nedosahují dobré úrovně, což se vysvětluje jejich menším průnikem do hydrofobizovaných povrchů tepelně upraveného dřeva Reinprecht (2008).

Při aplikaci tepelně upraveného dřeva vzniká jeden problém, na který si musíme dávat pozor, a to zvýšená koroze kovových spojovacích prostředků, ke které dochází zřejmě v důsledku přítomnosti zbylých podílů kyseliny mravenčí a octové.

Tepelně upravené dřevo získává až tmavě hnědou barvu, přičemž vyšší teploty a delší čas ohřevu způsobují tmavější odstíny hnědé. Jeho barva se často podobá některým tropickým dřevinám, např. teaku.

Zvýšená rozměrová stabilita působí příznivě na akustické vlastnosti dřeva, hlavně u hudebních nástrojů, které se používají v měnících se extrémních klimatických podmínkách.

Dřevo po termické úpravě získává i typickou vůni, která se dá přirovnat ke karamelu Reinprecht (2008). Protipožární odolnost u tepelně upraveného dřeva se víceméně shoduje s původním dřevem.

4.2 Mechanická modifikace – lisování

Lisování je děj, kdy na dřevo působí mechanické síly za účelem jeho modifikace. Při lisování dochází ke zhuštění struktury dřeva, což má vliv na zlepšení některých mechanických vlastností. Dřevo lze lisovat jen do hodnoty meze pevnosti, jinak dojde k porušení buněčné struktury, a tím k zhoršení vlastností. Každému podstatnějším zhuštění dřeva musí předcházet změkčení ligninu pomocí přechodné plastifikace. Na plastifikaci pozitivně působí vyšší vlhkost a také teplota, proto se dřevo zpravidla ohřívá ve vodní páře, nebo ve vodě. Plastifikuje se také pomocí chemického plastifikátoru (např. amoniak). Dřevo se po slisování a dosažení nového tvaru zafixuje, vysuší a ochladí. Tyto děje slouží k tomu, aby dřevu zůstal dosažený nový tvar Dejmal (2009).

Způsoby lisování lze rozdělit:

1. Podle počtu působících sil:

- Jedna síla (jednostranné lisování) – kolmo na vlákna (směr R nebo T)
– rovnoběžně s vlákny
- Dvě síly (dvoustranné lisování) – kolmo na vlákna (kombinace R a T)
- Více sil (vícestranné, prostorové lisování)

2. Podle rovnoměrnosti:

- Rovnoměrné: a) kolmo na vlákna,
b) rovnoběžně s vlákny,
c) izostaticky (ze všech stran najednou).
- Nerovnoměrné: a) kolmo na vlákna – po šířce materiálu
– po délce materiálu

Rovnoměrné lisování

Provádí se vytvořením plošného lisovacího tlaku na rovný povrch dřeva. Nejvyužívanějším směrem je lisování kolmo na dřevní vlákna. Tento postup vede ke zvýšení hustoty, což má vliv na zlepšenou tvrdost a pevnost upraveného dřeva. Další možností rovnoměrného lisování je lisovat plošným lisovacím tlakem ze všech stran najednou, tj. izostaticky. Známy je i způsob lisování rovnoběžně s dřevními vlákny, který vede k trvalému zlepšení ohebnosti dřeva Chuchrjanskij (1953), Dejmal (2009).

Nerovnoměrné lisování

Lze provést dvěma způsoby. Provádí se buď vytvořením plošného lisovacího tlaku na nerovný povrch, kdy je výsledkem materiál stejné tloušťky po celém svém průřezu, avšak hustota je rozdělena nerovnoměrně, nebo pomocí tvarované lisovací desky. V tomto případě je výsledkem materiál s rozdílnou tloušťkou i hustotou, přičemž v místech menší tloušťky má materiál vyšší hustotu a naopak v místech větší tloušťky má nižší hustotu. Tady je nevýhodou drahé zařízení tvarovacích forem Chuchrjanskij (1953).

4.3 Chemická modifikace dřeva

Chemická modifikace dřeva je založena na ošetření dřeva chemickými látkami bez přímého biocidního a nebo jiného ochranného účinku. Chemické modifikační látky zůstávají buď v lumenech buněk anebo pronikají i do buňečných stěn, přitom ve dřevě mohou vstupovat do chemických reakcí s ligninem, hemicelulózami a celulózu. Aktivně modifikované dřevo, v kterém vznikly chemické interakce mezi dřevní substancí a chemickou látkou (anhydridem kyseliny octové, furfurylalkoholem, epoxidem, 1,3-dimetylol-4,5-dihydroxy-etyl-močovinou = DMDHEU apod.), vstoupí vyšší odolnost vůči vodě, UV záření a biologickým škůdcům Rowell (1984), Hill (2006), Reinprecht (2008).

4.4 Enzymatické modifikace dřeva

Enzymatické modifikace dřeva spočívají v snížení podílu –OH fenolických skupin v ligninu, jako v –OH skupin v hemicelulózách a celulóze pomocí oxidačných a oxidačně-redukčních enzymů Reinprecht a Vidholová (2011).

5 ThermoWood

Nejvíce využívanou technologií tepelné modifikace dřeva je ThermoWood proces, ze kterého vychází produkt ThermoWood.

Produkt se vyvíjel ve finském výzkumném centru VTT ve spolupráci s finským průmyslem. ThermoWood je registrovaná značka, kterou pojmenovala a vlastní FinnishThermoWoodAssociation. Hlavní rolí asociace jsou kvalitativní kontroly vstupních materiálů, produktů a emisí.

Produkce ThermoWood je primárně situována ve Finsku, ale malá produkce se nachází také v Rakousku a Estonsku. V roce 2004 nastal také vývoj produkce v Kanadě. Prodej ThermoWood produktů je silný ve Finsku, od roku 2001 rapidně stoupá prodej ve Francii, Německu a zemí Beneluxu Hill (2006).

5.1 Charakteristické vlastnosti pro produkt ThermoWood

Pro vnější použití je doporučována povrchová úprava, protože zvyšuje odolnost proti působení ultrafialového záření slunečních paprsků, které vyvolávají změnu barvy a vznik drobných trhlinek. Důsledky UV záření lze omezit použitím speciálních nátěrových hmot nebo pigmentovými nátěrovými hmotami. Způsoby ošetření povrchu jsou stejné jako u normálního dřeva. Obvykle s použitím povrchové úpravy s vyšším obsahem pigmentu vzrůstá trvanlivost, ale zakrývá se originální kresba ThermoWoodu. ThermoWood může být opracován běžným strojním i ručním způsobem. Řezání a frézování je snadnější než u standardního dřeva. Při obrábění materiálu ThermoWood dochází k silnému zápachu, který však po krátké době vyprchá. Broušení dřeva je snadné a rychlé, ale vzniká při něm více prachu Král a Hrázský (2005).

Zlepšená odolnost vůči působení vlhkosti umožňuje v porovnání s neošetřeným dřevem použití prvků širších rozměrů. ThermoWood neobsahuje pryskyřici a je lehké, proto se s ním dobře pracuje. Velice dobré haptické vlastnosti mu zaručují dva hlavní faktory, a to absence pryskyřice a snížená tepelná vodivost. Proces ThermoWood dává dřevu charakteristickou sytě tmavě hnědou barvu.¹

¹www.finnforest.cz [online]. [Cit. 30. 11. 2016]. Dostupné z URL: <http://www.finnforest.cz/produkty/thermowood/Pages/interieroveprodukty.aspx>

Vztah ThermoWood k životnímu prostředí je velmi pozitivní i díky tomu, že nepoužívá žádné chemické modifikační látky.² Ačkoli mají produkty svoji charakteristickou vůni, neuvolňují do vzduchu žádné škodliviny. Celkový obsah těkavých organických látek (TVOC) je výrazně nižší než u neošetřeného měkkého dřeva z důvodu vypařování většiny terpenů v průběhu procesu tepelného ošetřování dřeva. Energie potřebná pro výrobu dřeva pochází z procesu spalování kůry a dřevěného odpadu. Spotřeba energie je mírně vyšší v porovnání s procesem obvyklého sušení řeziva. Pokud není ThermoWood lepen nebo lakován, může se s odpadem pracovat jako s jakýmkoli jiným odpadem z neošetřeného dřeva. Materiál je biologicky odbouratelný a na konci životnosti může být zlikvidován např. spálením nebo jiným obvyklým způsobem za podmínky dodržení místních norem a nařízení týkajících se manipulace s odpadem.³

5.2 Výrobní proces ThermoWood

Výrobní proces – termická úprava probíhá v rozsahu teplot 160-240°C. Během výroby ThermoWoodu se mění vnitřní uspořádání a s tím spojené fyzikální vlastnosti dřeva. Různé stupně termické úpravy dřeva jsou vhodné pro různé použití, konkrétní způsoby využití jsou závislé i na výsledné barvě. Čím vyšší je teplota úpravy, tím tmavší odstín upravené dřeviny získává. Termická úprava dřeva nijak nezatěžuje životní prostředí, jelikož tento proces vyžaduje pouze vodní páru a teplo. Výrobní proces ThermoWood: tepelně upravené profily (2013).

Při výrobě ThermoWoodu se nepoužívají toxické chemikálie, ale jen teplo (resp. také vodní pára), což je ekologicky výhodné z pohledu výroby i aplikace tohoto dřevěného materiálu. ThermoWood se vyznačuje zvýšenou trvanlivostí ve vnitřních i vnějších expozicích oproti neupravenému dřevu. Dnes se doporučuje pro vnitřní prostory – obklady, podlahy, kuchyňský nábytek, sauny apod., ale i pro některá venkovní zařízení. Je vhodný zejména do 3. třídy odolnosti bez kontaktu s terénem – obklady vnějších fasád, oplocení nad úroveň terénu, zahradní nábytek izolovaný od terénu, plastové podložky apod., popř. až do 4. třídy odolnosti – terasy, dětská hřiště, protihlukové bariéry, výstuže vodních kanálů apod. Reinprecht a Vidholdová (2008).

²www.finnforest.com [online]. [Cit. 30. 11. 2016]. Dostupné z URL: <http://www.finnforest.com/>

³www.finnforest.cz [online]. [Cit. 30. 11. 2016]. Dostupné z URL: <http://www.finnforest.cz/produkty/thermowood/Pages/zivotniprostredi.aspx>

5.3 Principy výroby

Termické úpravě dřeva můžeme podrobit jak vzduchosuché, tak i mokré dřevo. V procesu výroby se tepelná energie dodává buď z elektrických vyhřevných těles, nebo z tepelných olejových zásobníků. Plyny unikající ze dřeva je možno využít na energetické účely spalováním, čímž se souběžně také zabezpečuje ekologická stránka výrobního procesu, tj. nedochází ke znečišťování životního prostředí Reinprecht a Vidholdová (2008).

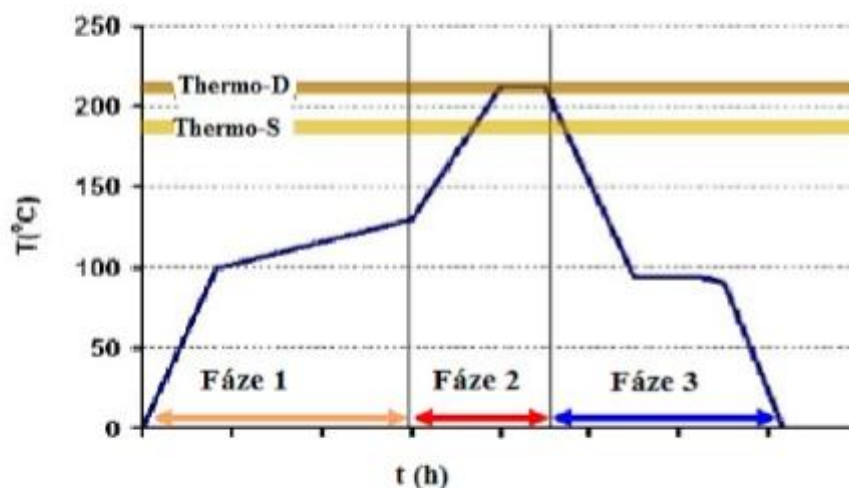
Výroba termodřeva se dá realizovat různými druhy technologií. Podle Reinprechta a Vidholdové (2008) se v Evropě používají nejvíce tyto technologie:

- 1) Příprava v atmosféře vzduchu – ThermoWood.
- 2) Příprava v prostředí vodní páry – PlatoWood.
- 3) Příprava v prostředí inertních plynů – RetificatedWood.
- 4) Příprava v olejích – OHTWood, RoyalWood.

Na výrobu termodřeva se používají jehličnany – borovice a smrk, i listnáče – bříza, osika atd., jejich podíl ale postupně klesá.

5.4 Princip technologie úpravy prostřednictvím atmosféry vzduchu

Stejně jako Reinprecht a Vidholdová (2008), tak i další dostupné zdroje informací - např. Barčík a Gašparík (2014) - uvádějí stejný tříetapový postup (viz Obrázek 4):



Obr. 4 Schéma výrobní technologie ThermoWood. ThermoWood Handbook (2003)

1. Zvýšení teploty a zvlhčení

Teplota se v komoře rychle zvyšuje na 100°C za působení vodní páry. Potom pozvolna stoupá na úroveň 130°C . Jako sušící medium se používá horký vzduch nebo horká pára. V průběhu této etapy se dřevo vysuší na přibližně nulovou vlhkost. Tato fáze je časově nejnáročnější. Dochází ke snížení relativní vlhkosti dřeva téměř na nulovou vlhkost. Celková doba této fáze je závislá na relativní vlhkosti vstupního materiálu, který termicky upravujeme Výrobní proces ThermoWood: tepelně upravené profily (2013).

2. Tepelná úprava

Ve druhé etapě se teplota zvýší na úroveň 180 až 215°C , případně na 240°C v průběhu dvou až tří hodin. Velikost teploty a čas jejího působení jsou dány požadavky na klasifikační třídu ThermoWood materiálu. Během této fáze probíhá samotná úprava materiálu. V závislosti na požadovaném stupni úpravy je zvyšována teplota v komoře až na konečnou teplotu (např. 240°C). Následně je tato teplota udržována po celou dobu

procesu tj. dvě až tři hodiny, v závislosti na konkrétním nastavení procesu Výrobní proces ThermoWood: tepelně upravené profily (2013).

3. Chlazení a úprava vlhkosti

V poslední etapě se tepelně upravované dřevo postupně ochlazuje a při teplotě 80-90°C se postupně kondicionizuje. V tomto stupni se dřevo postupně ochlazuje až na teplotu srovnatelnou s teplotou okolního prostředí. Pokud by výstupní teplota materiálu byla výrazně vyšší než teplota okolního prostředí, mohlo by docházet k poškození materiálu. Spolu se snižováním teploty je prováděno i vlhčení tak, abychom materiál zvlhčili na vlhkost vhodnou k jeho následnému zpracování, tj. cca 10–12 % relativní vlhkosti. Dle konkrétního stupně termické úpravy materiálu je dlouhá i tato třetí fáze, zpravidla trvá 5 až 15 hodin Výrobní proces ThermoWood: tepelně upravené profily (2013).

5.5 Princip technologie úpravy prostřednictvím vodní páry

Plato-technologie se skládá ze čtyř tepelných etap realizovaných při normálním a zvýšeném tlaku. Doba trvání celého procesu závisí především na druhu dřeva a jeho tloušťce.

1. Hydrotermolýza

Hydrotermická úprava čerstvého nebo vzduchosuchého dřeva při teplotě 150–190°C při zvýšeném tlaku 0,6–1 MPa v době trvání 4–5 hodin s použitím vodní páry (jestliže jde o vzduchosuché dřevo), nebo horkého vzduchu (jestliže zpracováváme čerstvé dřevo). Toto se děje v tlakové nádobě a vlhkost dřeva se podstatně nemění Reinprecht a Vidholdová (2008).

2. Sušení

Dřevo se suší v klasické sušicí komoře po dobu 3-5 dní, popř. i déle (do 3 týdnů).

3. Tvrzení

Třetí fází je stabilizace dřeva, tzv. jeho tvrzení. Trvá po dobu 12–16 hodin při teplotě 150–190°C a při atmosférickém tlaku 0,1 MPa, ale za omezeného přístupu vzduchu.

4. Kondicionování

Jde o opětovné zvlhčení dřeva v sušicí komoře. Tato etapa trvá přibližně tři dny.

5.6 Princip technologie úpravy v prostředí inertních plynů

Retifikované dřevo se připravuje v inertním prostředí dusíku při poměrně vysokých teplotách až 260°C podle licenčního Retifikačního procesu (NOW – New Option Wood, Francie). Princip je založen na postupném zvyšování teploty dřeva až na 210–260°C v inertním prostředí dusíku, kdy podíl kyslíku musí být menší než 2 %. Dřevo přitom mírně pyrolyzuje. Termooxidační reakce ve dřevě probíhají jen v malé míře, čímž se víceméně zachová jeho původní pevnost. Před samotným retifikačním procesem je třeba dřevo předsušit na 12% vlhkost Reinprecht a Vidholdová (2008).

5.7 Princip technologie úpravy v olejích

Termická úprava dřeva olejem se děje za sníženého tlaku a při poměrně nízké teplotě 60–90°C. Tato technologie se dříve používala pouze na sušení dřeva. Použitý olej nevniká do buněčných stěn dřeva a po ukončení procesu se z impregnačního kotle odsává ve vakuu. Tento proces zpracování dřeva se dnes používá jen ojediněle, protože existují dokonalejší způsoby zpracování termodřev Reinprecht a Vidholdová (2008).

6 Metodika práce

Na základě cíle bakalářské práce je možné metodiku práce rozdělit do následujících bodů:

1. Materiál a jeho příprava.
2. Klimatizace vzorků.
3. Termická úprava.
4. Metody měření.
5. Vyhodnocení experimentálních získaných dat.

6.1 Materiál a jeho příprava

Na výzkum byly použity zkušební tělesa ze dřeva Meranti a Merbau. Výzkum tvořily dva základní soubory zkušebních těles:

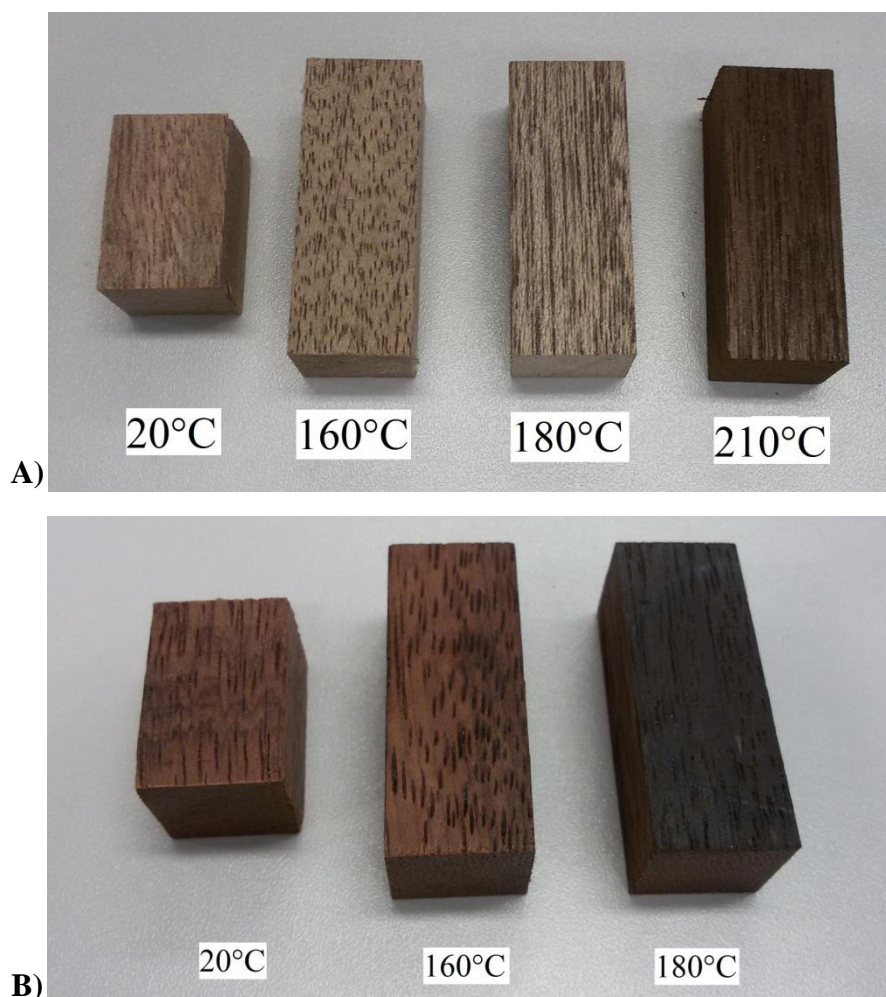
- soubor zkušebních těles nepodrobený termické úpravě (20°C),
- soubor termicky upravených zkušebních těles (160°C, 180°C, 210°C).

Sledovanými charakteristikami byly:

- účinek termické úpravy na barevné změny,
- účinek termické úpravy na tvrdost dřeva.

Výsledky naměřené na tělesech termicky neupravených jsme porovnali s výsledky získanými na termicky upravených tělesech Meranti (Shorea) a Merbau (Intsia).

U dřeviny Merbau, která měla být modifikována teplotou 210°C, se nepodařilo z důvodu neočekávané závažné poruchy na termo komoře připravit modifikované dřevo.

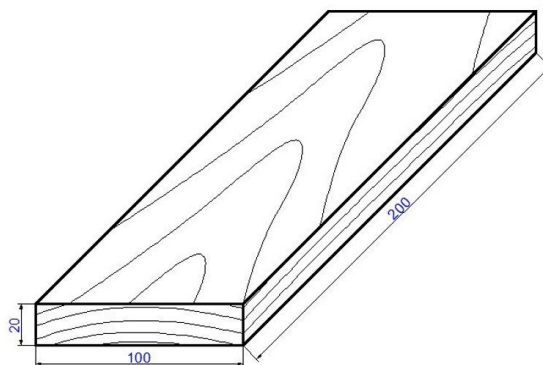


Obr. 5 Zkušební tělesa termicky modifikovaného dřeva při rozdílných teplotách u dřeviny: A) Meranti, B) Merbau (Teploty 20°C, 160°C, 180°C, 210°C).

Další fází zpracování materiálu pro přípravu zkušebních vzorků bylo vyříznutí vzorků z vybraného materiálu. Z těchto materiálů byly získány vzorky dle platných norem ČSN. Výzkum, přípravu, měření jsme prováděli v odborných dílnách a laboratořích Fakulty lesnické a dřevařské na České zemědělské univerzitě v Praze.

Z těchto vzorků byly vyloučeny vzorky nesprávně vyříznuté, vzorky s makroskopickými vadami (suky, praskliny apod.), popř. další nevhodné vzorky, které by mohly ovlivnit výsledky měření.

Rozměry zkušebních těles určených na hodnocení barevných změn a měření podle Brinella byly 20x100x200mm (tloušťka x šířka x délka) radiálně řezané (viz Obrázek 6).



Obr. 6 Zkušební těleso pro hodnocení barevných změn a měření podle Brinella

6.2 Klimatizace vzorků

Po zhotovení přírodních i termicky upravených vzorků proběhla jejich klimatizace v laboratořích ČZU v Praze. Vzorky byly proloženy tak, aby byl zajištěn volný přístup vzduchu ze všech jejich stran při teplotě 23°C a relativní vlhkosti vzduchu 40 %. Takto byly vzorky ponechány několik dní, tím bylo dosaženo rovnovážné relativní vlhkosti 8 %. Vlhkost byla zjištěna váhovou metodou vypočtena podle vzorce (12):

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100\% \quad (12)$$

kde: m_1 - hmotnost zkušebního tělesa ve vlhkém stavu(g)

m_0 - hmotnost zkušebního tělesa ve vysušeném stavu (g)

W – vlhkost (%)

6.3 Termická úprava vzorků

Proces termické modifikace probíhal podle následujících stupňů:

1. Vytápění a sušení - v této fázi, teplota rychle stoupá v sušárně při teplotě asi 100°C pro podporu působení páry. Potom se rozteč snižuje a zvyšuje se na úroveň 130°C. Sušicím médiem je horký vzduch nebo horká pára. V průběhu této fáze se dřevo suší přibližně na nulovou vlhkost.

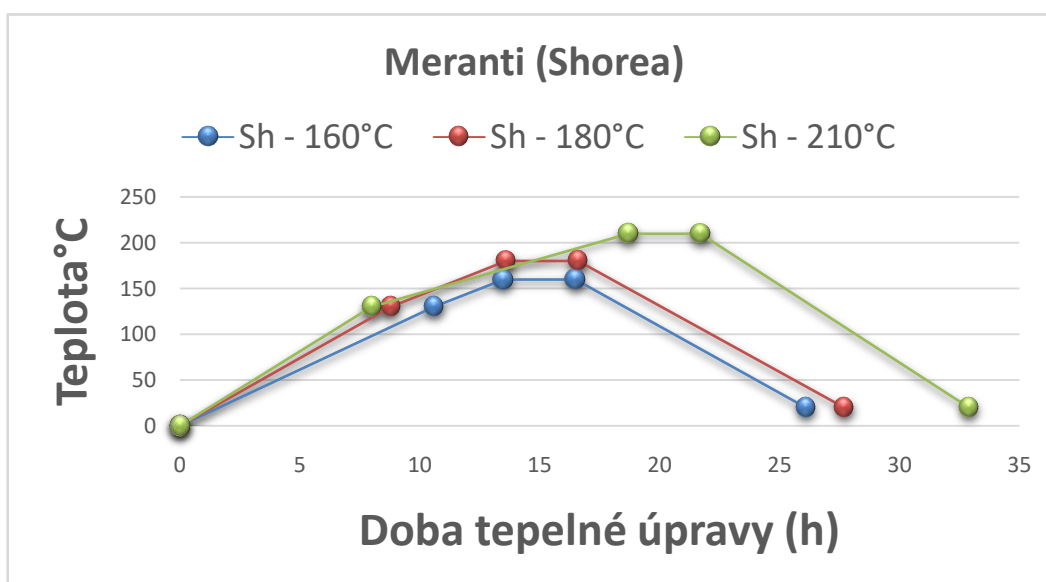
2. Tepelná modifikace - ve druhém stupni se teplota zvýší na úroveň 185-230°C po dobu 2-3 hodin. Velikost teploty a doby působení jsou dány požadavky třídy výrobků ThermoWood (Thermo-S a Thermo-D)

3. Chlazení a klimatizace - ve třetí fázi se tepelně modifikované dřevo postupně ochladí na teplotu 80-90°C a vlhkost vzduchu je stabilizována tak, aby konečný obsah vlhkosti byl normální 4-7 %.

Parametry termické úpravy zkušebních těles jsou uvedeny v Tabulce 1 a 2 režim termické úpravy znázorňuje Obrázek 7 a 8.

Tab. 1 Parametry termické úpravy zkušebních těles Meranti

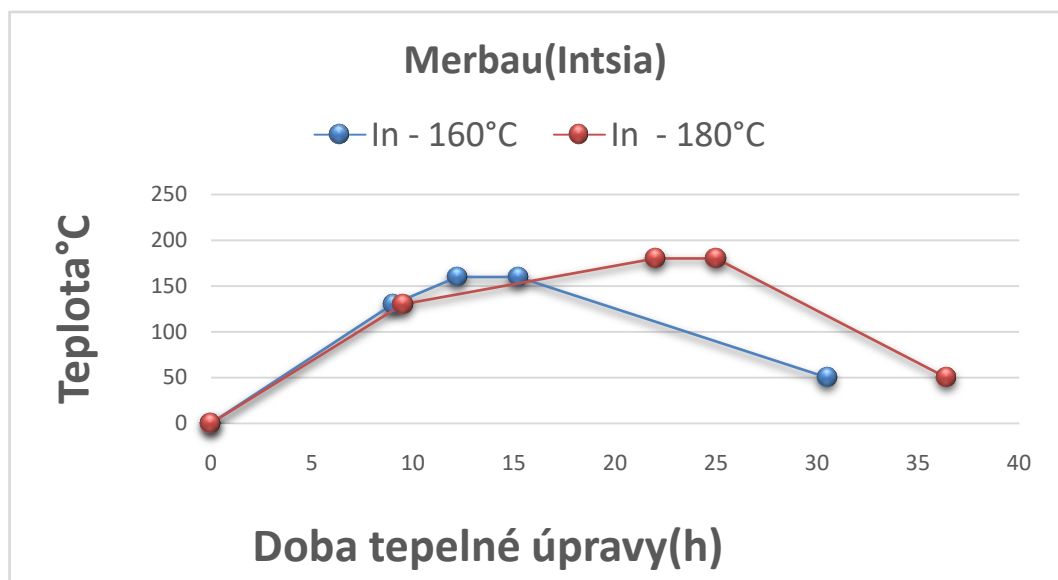
Vstupní technologické parametry			
Vlhkost dřeva	2 - 4 %		
Kapacita	0.8 m ³		
Maximálně dosažená teplota	210°C		
Tepelný proces modifikace			
Stupně modifikace	160°C	180°C	210°C
Vytápění a sušení	10.6h	8.8h	8h
Tepelná modifikace	13,5 h	13,6 h	18,7 h
Chlazení a klimatizace	16,5 h	16,6 h	21,7 h
Celková doba úpravy	50,2h	50,1h	59,6 h



Obr. 7 Teplotní postup modifikace vzorku (Meranti 160°C, Meranti 180°C, Meranti 210°C)

Tab. 2 Parametry termické úpravy zkušebních těles Merbau

Vstupní technologické parametry			
Vlhkost dřeva	2 - 4 %		
Kapacita	0.8 m ³		
Maximálně dosažená teplota	210°C		
Tepelný proces modifikace			
Stupně modifikace	160°C	180°C	210°C
Vytápění a sušení	9 h	9,5 h	-
Tepelná modifikace	12,2 h	22 h	-
Chlazení a klimatizace	12,6h	36,4 h	-
Celková doba úpravy	51,7 h	67,9 h	-



Obr. 8 Teplotní postup modifikace vzorku (Merbau 160°C, Merbau 180°C)

6.4 Metody měření

6.4.1 Barevná změna

Barva se nejprve měřila před samotnou termickou úpravou, abychom dostali referenční hodnoty potřebné k přepočtu celkové barevné změny ΔE^* . Měřili jsme na každém vzorku ve třech místech a pro zabezpečení co nejpřesnějších výsledků měření probíhalo na stanovených místech. Celková změna barvy ΔE^* byla hodnocena podle Cividini et. al., (2007). (viz Tabulka 3).

Tab. 3 Kritéria pro vyhodnocení celkové změny barvy ΔE^*

$\Delta E < 0,2$	Neviditelný rozdíl
$0,2 < \Delta E < 2$	Malý rozdíl
$2 < \Delta E < 3$	Barevná změna viditelná s vysoko kvalitním filtrem
$3 < \Delta E < 6$	Barevná změna viditelná se středně kvalitním filtrem
$6 < \Delta E < 12$	Vysoká barevná změna
$\Delta E < 12$	Odlišná barva

Barevné rozdíly byly hodnoceny podle celkové barevné změny, která byla vypočítána podle vzorce (13) získaného z ISO 11644-4 (2008) a ISO 11664-6 (2013),

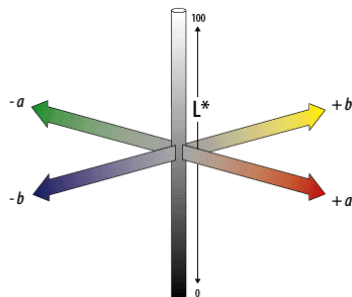
$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}} \quad (13)$$

kde ΔE^* je celková změna barvy a ΔL^* , Δa^* a Δb^* jsou rozdíly mezi referenčními hodnotami a hodnotami získanými po termické úpravě vzorků a jsou získány přepočtem základních souřadnic podle vzorce (14).

$$\begin{aligned} \Delta a^* &= a_2 - a_1, a_3 - a_1, \dots, a_x - a_1 \\ \Delta b^* &= b_2 - b_1, b_3 - b_1, \dots, b_x - b_1 \\ \Delta L^* &= L_2 - L_1, L_3 - L_1, \dots, L_x - L_1 \end{aligned} \quad (14)$$

Naměřené hodnoty byly vyhodnocovány v programu Statistica 12. Hodnoty byly vyhodnocovány dvoufaktorovou analýzou. Faktorem analýzy byl způsob termické modifikace (20°C, 160°C, 180°C a 210°C). Vyhodnocovanými hodnotami byly změnsouřadnic barevného prostoru L^* , a^* , b^* a celková změna barevného prostoru

ΔE^* . Souřadnice L^* vyjadřuje jas v % (0% černá a 100% bílá), souřadnice a^* vyjadřuje odstíny od červené po zelenou, souřadnice b^* vyjadřuje odstíny od žluté po modrou – (viz Obrázek 9). Při vyhodnocování barevného prostoru L^* , a^* , b^* jsme vycházeli z teorie popsané v práci Kubovký a Urgela (2004).



Obr. 9 Grafické znázornění metody CIE $L^*a^*b^*$
www.dba.med.sc.edu

6.4.2 Tvrdost podle Brinella

Tvrdost podle Brinella byla stanovena v radiálním směru (na tangenciální povrch vzorku) na třech místech ve středu šířky vzorku (paralerní k délce vzorku), podle normy EN 1534 (2010) s určitými modifikacemi. Měření tvrdosti byla provedena za použití DuraVision-30 tvrdoměru (Struers, Dánsko) s ocelovým karbidovým lisovníkem. Tvrdost tester automaticky zachytil zatěžovací sílu, měřenou hloubku a průměr odsazení a následně vypočítal hodnotu tvrdosti z těchto údajů. Maximální zatěžovací síla se udržuje po dobu 10 sekund a následně je síla po 10 sekundách vyhodnocena. Parametry pro měření Brinellovou metodou jsou uvedeny v (Tabulce 4).

Tab. 4 Parametry tvrdosti podle Brinella

Tvrdost podle Brinella		
Dřeviny	Podmínky	Popis
Meranti Merbau	$H_{BW} 10^1/500^2/10^3$	¹ 10 = Průměr karbidové kuličky (mm) ² 500 = Konstantní zatěžovací síla (N) ³ 10 = Měření času (sec)

Tvrdość podle Brinella je vypočtena použitím tvrdoměru podle normy EN 1534 (2010) a rovnice(15):

$$H_{BW} = \frac{2F}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (15)$$

kde H_{BW} - tvrdost podle Brinella (MPa),

F - maximální zatěžovací síla (N)

D - průměr karbidové kuličky (mm)

d - průměr zbytkového zářezu (mm)

Hodnoty tvrdosti podle Brinella následně převede na obsah vlhkosti 12% podle Dubovsky et al. (2003) a rovnice(16):

$$H_{BW_{12}} = H_B [1 + \alpha(w - 12)] \quad (16)$$

kde $H_{BW_{12}}$ - tvrdost podle Brinella na obsah vlhkosti 12 % (MPa)

H_B - tvrdost podle Brinella na obsahu vlhkosti v průběhu testování (MPa),

W - obsah vlhkosti vzorku v průběhu zkoušky (%)

α - opravný koeficient vlhkosti pro tvrdost kolmo k vláknům, která byla rovna 0,025 pro všechny druhy dřeva

Hustota dřeva se určuje při testování podle ISO 13061-2 (2014) a rovnice(17):

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (17)$$

kde ρ_w - hustota vzorku (kg / m³)

m_w - hmotnost vzorku (kg)

V_w - objem vzorku (m³)

Obsah vlhkosti ve vzorcích byl stanoven podle normy ISO 13061-1 (2014) a rovnice(18):

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (18)$$

kde w - obsah vlhkosti ve vzorcích (%)

m_w - hmotnost vlhkého vzorku (kg)

m_0 - hmotnost suchého vzorku (kg)

Sušení v sušárně bylo provedeno podle normy ISO 13061-1 (2014).

6.4.3 Zpracování výsledků v softwaru Statistica

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita vícefaktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich dvou, tří nebo čtyř vzájemných kombinací. K tomuto ohodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemnou kombinací byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Podle hodnoty P lze testovaný faktor ohodnotit takto:

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

6.5 Vyhodnocení experimentálních získaných dat

6.5.1 Zpracování a vyhodnocení dat

Hodnoty naměřené při jednotlivých zkouškách byly zaznamenávány a zpracovávány dle platných norem ČSN. Naměřená data byla rozdělena do několika sekcí dle označení vzorků.

6.5.2 Statické zpracování dat

Statické zpracování dat naměřených vzorků bylo zpracováno a zaznamenáváno pomocí tabulkového editoru Microsoft Excel 2010. Z tohoto programu byla data následně exportována do programu Statistica 12, kde proběhlo jejich statické vyhodnocení.

6.5.3 Výsledky a diskuze

6.5.3.1 Barevná změna

V tabulce 5 jsou uvedeny průměrné hodnoty souřadnic barevného prostoru L^* , a^* , b^* a průměrné hodnoty celkové změny barevného prostoru ΔE^* pro dřevinu Meranti.

Tab. 5 Průměrné hodnoty pro dřevinu Meranti

Dřevina	Tepelná úprava (°C)	L^*	a^*	b^*	ΔE
Meranti	20	60,45	9,32	16,40	-
Meranti	160	47,08	7,79	14,01	11,08
Meranti	180	43,22	7,87	15,747	16,95
Meranti	210	32,59	7,1	10,37	32,45

V tabulce 6 jsou uvedena statistická hodnocení vlivu teploty na hodnoty změny barvy pro dřevinu Meranti. Z tabulky je zřejmé, že na základě hodnot hladiny významnosti „P“ je možno konstatovat, že termická úprava je statisticky velmi významným faktorem působícím na hodnoty souřadnice barevného prostoru L^* , a^* , b^* a celkové změny barevného prostoru ΔE^* .

Tab. 6 Statistické hodnocení vlivu faktorů na hodnoty změny barvy pro dřevinu Meranti

L*					
Hodnocené faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	302564.2	1	302564.2	9969.674	***
Tepelná úprava	20468.7	3	6822.9	224.819	***
Chyby	5341.3	176	30.3		
a*					
Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	9277.093	1	9277.093	3701.598	***
Tepelná úprava	146.401	3	48.800	19.472	***
Chyby	441.098	176	2.506		
b*					
Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	28773.32	1	28773.32	6841.031	***
Tepelná úprava	863.15	3	287.72	68.406	***
Chyby	740.25	176	4.21		
ΔE					
Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	32936.31	1	32936.31	4429.047	***
Tepelná úprava	25609.32	3	8536.44	1147.922	***
Chyby	1308.81	176	7.44		

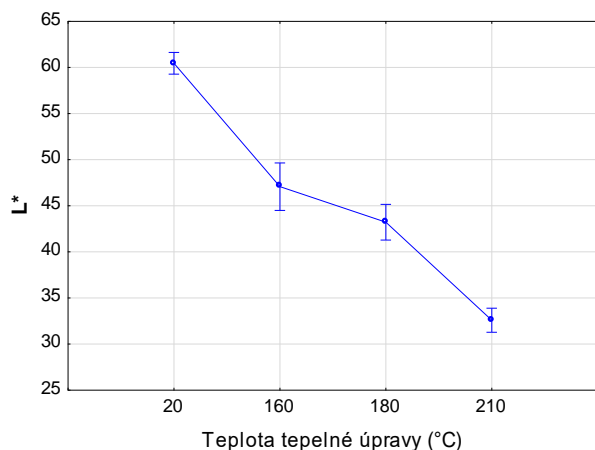
NS- nejsou významné, *** - významné , Význam byl přijat na $P < 0,01$

V tabulce 7 jsou pro hlubší analýzu vlivu teploty uvedena srovnání faktorů při použití Duncanova testu pro dřevinu Meranti. Z tabulky je zřejmé, že na základě hodnot je možno konstatovat, že termická úprava měla významný vliv, který působil na změnu hodnoty souřadnice barevného prostoru a^* a b^* . To znamená, že teplota ovlivňuje změnu barvy.

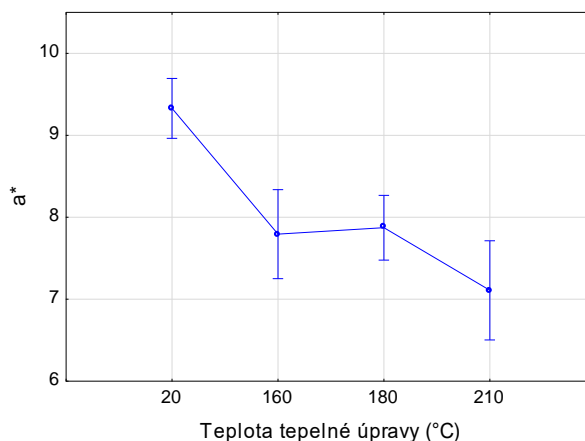
Tab. 7 Srovnání jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu pro dřevinu Meranti.

Celková změna souřadnice L *					
Tepelná úprava (°C)		(1)	(2)	(3)	(4)
		60.455	47.080	43.224	32.000
Meranti	20		0.000	0.000	0.000
Meranti	160	0.000		0.003	0.000
Meranti	180	0.000	0.003		0.000
Meranti	210	0.000	0.000	0.000	
Celková změna souřadnice a *					
Tepelná úprava (°C)		(1)	(2)	(3)	(4)
		9.3292	7.7950	7.8733	7.1083
Meranti	20		0.000	0.000	0.000
Meranti	160	0.000		0.834	0.066
Meranti	180	0.000	0.834		0.052
Meranti	210	0.000	0.066	0.052	
Celková změna souřadnice b *					
Tepelná úprava (°C)		(1)	(2)	(3)	(4)
		16.405	14.015	15.747	10.375
Meranti	20		0.000	0.173	0.000
Meranti	160	0.000		0.000	0.000
Meranti	180	0.173	0.000		0.000
Meranti	210	0.000	0.000	0.000	
Celková změna barevného prostoru ΔE					
Tepelná úprava (°C)		(1)	(2)	(3)	(4)
		0.000	11.085	16.958	32.452
Meranti	20		0.000	0.000	0.000
Meranti	160	0.000		0.000	0.000
Meranti	180	0.000	0.000		0.000
Meranti	210	0.000	0.000	0.000	

Význam byl přijat na $P < 0,01$



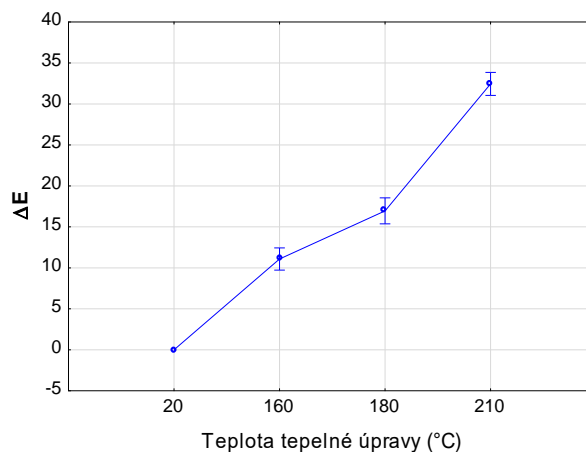
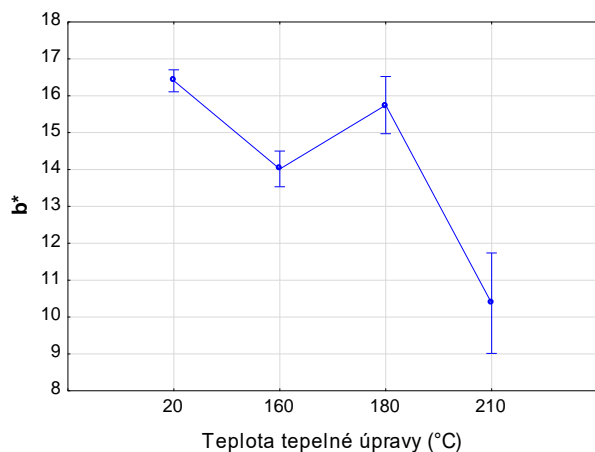
Obr. 10 Grafické znázornění změny souřadnice L* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti



Obr. 11 Grafické znázornění změny souřadnice a* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti

Na obrázku 10 je grafické znázornění změny souřadnice L* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti. Z obrázku je zřejmé, že referenční hodnoty při 20°C dosahují hodnoty 61. Při tepelné úpravě 160°C hodnota souřadnice L* dosáhla hodnoty 47. Při tepelné úpravě 180°C se hodnota souřadnice L* snížila na velikost hodnoty 43. Při tepelné úpravě 210°C se hodnota souřadnice L* snížila na hodnotu 33. Rozdíly naměřených hodnot nejsou statisticky významné.

Na obrázku 11 je grafické znázornění změny souřadnice a* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti. Z obrázku je zřejmé, že referenční hodnoty při 20°C dosahují hodnoty 9,3. Při tepelné úpravě 160°C a 180°C hodnota souřadnice a* dosáhla podobné hodnoty 7,9. A při tepelné úpravě 210°C hodnota souřadnice a* poklesla na nižší hodnotu 7,1. Rozdíly hodnot jsou statisticky významné.



<p>Obr. 12 Grafické znázornění změny souřadnice b* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti</p>	<p>Obr. 13 Grafické znázornění celkové změny barvy ΔE v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti</p>
---	--

Na obrázku 12 je grafické znázornění změny souřadnice b* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti. Z obrázku je zřejmé, že referenční hodnoty při 20°C dosahují hodnoty 9,3. Při tepelné úpravě 160°C hodnota souřadnice b* dosáhla hodnoty 14. Při tepelné úpravě 180°C se hodnota souřadnice b* zvýšila na 15,8. Při tepelné úpravě 210°C hodnota souřadnice b* prudce poklesla na 10,5. Rozdíly hodnot jsou statisticky významné.

Na obrázku 13 je grafické znázornění celkové změny barvy ΔE* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Meranti. Z obrázku je zřejmé, že referenční hodnoty při 20°C dosahují nulové hodnoty. Při tepelné úpravě 160°C hodnota celkové změny barvy ΔE* dosáhla hodnoty 12. Při tepelné úpravě 180°C hodnota celkové změny barvy ΔE* dosáhla na 17. Při tepelné úpravě 210°C se hodnota celkové změny barvy ΔE* zvýšila na 32. Rozdíly naměřených hodnot nejsou statisticky významné.

V tabulce 8 jsou uvedeny změny souřadnic barevného prostoru L*, a* a b* a celková změna barevného prostoru ΔE* v průběhu termické modifikace vzorků pro dřevinu Meranti. Z tabulky je zřejmé, že při termické úpravě 160°C lze celkovou změnu barvy ΔE* ohodnotit jako vysokou barevnou změnu. Dále při termické úpravě 180°C a 210°C lze celkovou změnu barvy ΔE* ohodnotit stupněm odlišná barva.

Tab. 8 Změna souřadnice barevného prostoru L*, a* a b* a celková změna barevného prostoru ΔE^* v průběhu termické modifikace vzorků

Dřevina	Tepelná úprava (°C)	Celková změna barvy	Hodnocení	
		ΔE^*	Kritéria	Popis
Meranti	160 °C	11,08	$6 < \Delta E < 12$	Vysoká barevná změna
	180 °C	16,95	$\Delta E < 12$	Odlišná barva
	210 °C	32,45	$\Delta E < 12$	Odlišná barva

V tabulce 9 jsou uvedeny průměrné hodnoty pro základní barevný prostor L*, a*, b* a hodnoty celkové změny barevného prostoru ΔE^* pro dřevinu Merbau. Z tabulky je zřejmé, že referenční hodnoty souřadnice L* dosahují při 20°C hodnoty 39,38. Při termické úpravě 160°C se změny souřadnice L* snížily na hodnotu 30,32. Při termické úpravě 180°C se změny souřadnice L* snížily na hodnotu 27,69. Z tabulky je zřejmé, že referenční hodnoty souřadnice a* dosahují při 20°C hodnoty 11,32. Při termické úpravě 160°C se souřadnice a* snížily na hodnotu 7,71. Při termické úpravě 180°C se souřadnice a* snížily na hodnotu 3,7. Z tabulky je zřejmé, že referenční hodnoty souřadnice b* dosahují při 20°C hodnoty 14,56. Při termické úpravě 160°C se souřadnice b* snížily na hodnotu 6,73. Při termické úpravě 180°C se souřadnice b* snížily na hodnotu 3,44. Při tepelné úpravě 160°C celková změna barvy ΔE^* dosáhla hodnoty 11,8. Při tepelné úpravě 180°C hodnota celková změna barvy ΔE^* dosáhla hodnoty 18,33.

Tab. 9 Průměrné hodnoty dřeviny Merbau

Dřevina	Tepelná úprava (°C)	L*	a*	b*	ΔE
Merbau	20	39,38	11,32	14,56	-
Merbau	160	30,32	7,71	6,73	11,8
Merbau	180	27,69	3,7	3,44	18,33
Merbau	210	-	-	-	-

V tabulce 10 jsou uvedena statistická hodnocení vlivu teploty na hodnoty změny barvy pro dřevinu Merbau. Z tabulky je zřejmé, že na základě hodnot hladiny významnosti „P“ je možno konstatovat, že tepelná modifikace neměla významný vliv působící na hodnoty souřadnice barevného prostoru L*, a*, b* a celkové změny barevného prostoru ΔE^* .

Tab. 10 Statistické hodnocení vlivu faktorů na hodnoty změny barvy pro dřevinu Merbau

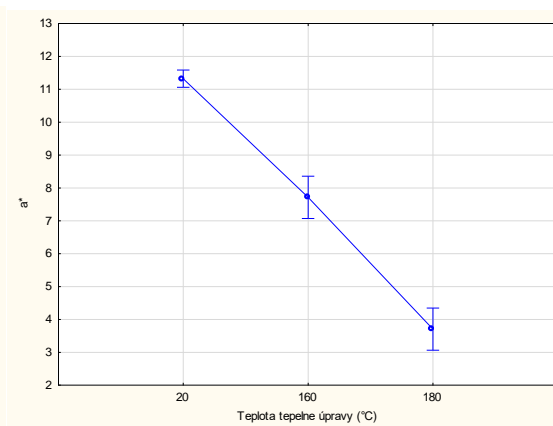
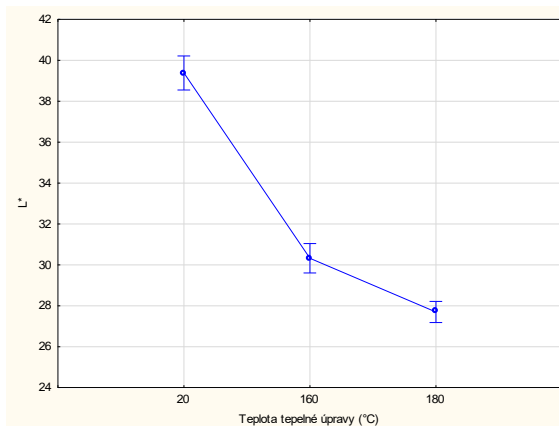
L*					
Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	104555,1	1	104555,1	15602,88	0,00
Tepelná úprava	3151,4	2	1575,7	235,14	0,00
Chyby	743,8	111	6,7		
a*					
Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	5700,306	1	5700,306	3197,530	0,00
Tepelná úprava	1112,727	2	556,364	312,087	0,00
Chyby	197,882	111	1,783		
b*					
Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	6743,690	1	6743,690	1734,316	0,00
Tepelná úprava	2696,447	2	1348,223	346,731	0,00
Chyby	431,611	111	3,888		
ΔE					
Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	10012,21	1	10012,21	1559,939	0,00
Tepelná úprava	7031,67	2	3515,83	547,779	0,00
Chyby	712,44	111	6,42		

NS- nejsou významné, *** - významné, Význam byl přijat na $P < 0,01$

V tabulce 11 jsou pro hlubší analýzu vlivu teploty uvedena srovnání faktoru při použití Duncanova testu pro dřevinu Merbau. Z tabulky je zřejmé, že na základě hodnot je možno konstatovat, že tepelná modifikace neměla statisticky významný vliv, který působil na hodnoty souřadnice barevného prostoru L*, a*, b* a celkovou změnu barevného prostoru ΔE^* .

Tab. 11 Srovnání jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu pro dřevinu Merbau

Celková změna souřadnice L*				
Tepelná úprava (°C)		(1)	(2)	(3)
		39,383	30,323	27,697
Merbau	20		0,000	0,000
Merbau	160	0,000		0,000
Merbau	180	0,000	0,000	
Celková změna souřadnice a*				
Tepelná úprava (°C)		(1)	(2)	(3)
		11.324	7.7148	3.7048
Merbau	20		0,000	0,000
Merbau	160	0,000		0,000
Merbau	180	0,000	0,000	
Celková změna souřadnice b*				
Tepelná úprava (°C)		(1)	(2)	(3)
		14.561	6.7352	3.4415
Merbau	20		0,000	0,000
Merbau	160	0,000		0,000
Merbau	180	0,000	0,000	
Celková změna barevného prostoru ΔE				
Tepelná úprava (°C)		(1)	(2)	(3)
		0.000	11.804	18.338
Merbau	20		0,000	0,000
Merbau	160	0,000		0,000
Merbau	180	0,000	0,000	

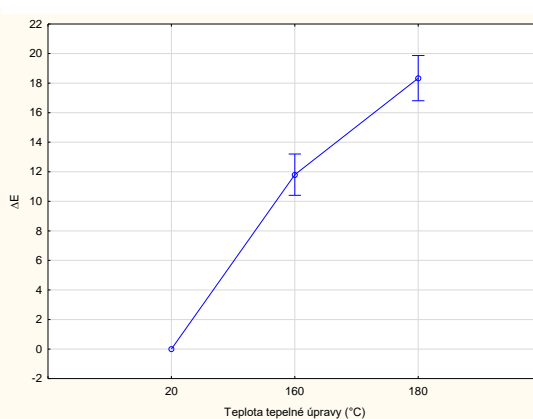
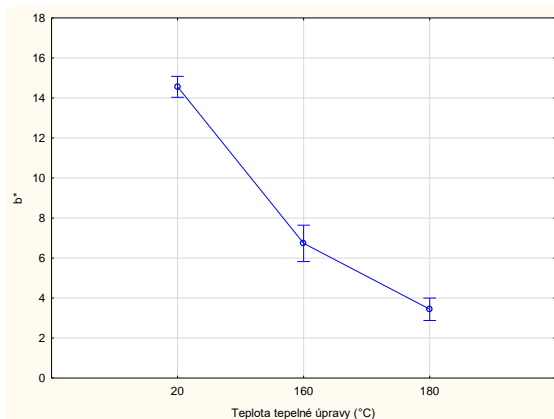


Obr. 14 Grafické znázornění změny souřadnice L* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau

Obr. 15 Grafické znázornění změny souřadnice a* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau

Na obrázku 14 je grafické znázornění změny souřadnice L* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau. Z obrázku je zřejmé, že referenční hodnoty při 20°C dosahují hodnoty 39. Při tepelné úpravě 160°C se hodnota souřadnice L* snížila na hodnotu 30,5. Při tepelné úpravě 180°C se hodnota souřadnice L* snížila na hodnotu 28. Tyto hodnoty nejsou statisticky významné.

Na obrázku 15 je grafické znázornění změny souřadnice a* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau. Z obrázku je zřejmé, že referenční hodnoty při 20°C dosahují hodnoty 11,2. Při tepelné úpravě 160°C se hodnota souřadnice a* snížila na hodnotu 7,8. Při tepelné úpravě 180°C se hodnota souřadnice a* snížila na hodnotu 3,8. Tyto hodnoty nejsou statisticky významné.



Obr. 16 Grafické znázornění změny souřadnice b^* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau

Obr. 17 Grafické znázornění změny celkové změny barvy ΔE v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau

Na obrázku 16 je grafické znázornění změny souřadnice b^* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau. Z obrázku je zřejmé, že referenční hodnoty při 20°C dosahují hodnoty 14,5. Při tepelné úpravě 160°C hodnota souřadnice b^* dosáhla hodnoty 7. Při tepelné úpravě 180°C hodnota souřadnice b^* poklesla na 3,5. Tyto hodnoty nejsou statisticky významné.

Na obrázku 17 je grafické znázornění celkové změny barvy ΔE^* v průběhu termické modifikace pro dřevinu Merbau. Z obrázku je zřejmé, že referenční hodnoty při 20°C dosahují nulové hodnoty. Při tepelné úpravě 160°C hodnota celkové změny barvy ΔE^* dosáhla hodnoty 12. Při tepelné úpravě 180°C se hodnota celkové změny barvy ΔE^* zvýšila na 19,2. Tyto hodnoty nejsou statisticky významné.

V tabulce 12 jsou uvedeny změny souřadnic barevného prostoru L^* , a^* a b^* a celková změna barevného prostoru ΔE^* v průběhu termické modifikace vzorků pro dřevinu Merbau. Z tabulky je zřejmé, že při tepelné modifikaci 160°C lze celkovou změnu barvy ΔE^* ohodnotit jako vysokou změnu barvy. Dále při tepelné modifikaci 180°C lze celkovou změnu barvy ΔE^* ohodnotit stupněm odlišná barva.

Tab. 12 Změna souřadnice barevného prostoru L*, a* a b* a celková změna barevného prostoru ΔE^* v průběhu termické modifikace vzorků

Dřevina	Tepelná úprava (°C)	Celková změna barvy	Hodnocení	
		ΔE^*	Kritéria	Popis
Merbau	160 °C	11,80	$6 < \Delta E < 12$	Vysoká barevná změna
	180 °C	18,33	$\Delta E < 12$	Odlišná barva

6.5.3.2 Tvrдость

V tabulce 13 jsou uvedeny průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Meranti a Merbau. Dále jsou uvedeny hodnoty Brinellovi tvrdosti při 12% vlhkosti a také hustota obou dřevin při 12% vlhkosti. Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %.

Tab. 13 Průměrné hodnoty tvrdosti podle Brinella

Dřevina	Tepelná úprava (°C)	Brinellova tvrdost H_{BW} (MPa)	Brinellova tvrdosti při 12% vlhkosti H_{BW12} (MPa)	Hustota při 12% (Kg/m ³)
Meranti	20	57 (4.5)	44 (4.5)	651 (5.8)
Meranti	160	45 (12.5)	33 (12.5)	610 (6.5)
Meranti	180	40 (18.0)	34 (18.0)	455 (4.3)
Meranti	210	48 (16.8)	35 (16.8)	642 (6.4)
Merbau	20	82 (10.6)	64 (10.6)	808 (6.2)
Merbau	160	79 (11.3)	59 (11.3)	769 (7.3)
Merbau	180	66 (12.2)	48 (12.2)	784 (5.9)
Merbau	210	-	-	-

V tabulce 14 jsou uvedena statistická hodnocení vlivu termické modifikace na hodnoty tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Meranti. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“ je možno konstatovat, že tepelná modifikace je statisticky velmi významným faktorem působícím na hodnoty tvrdosti dřeva.

Tab. 14 **Statistické hodnocení vlivu faktorů tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Metanti**

Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	188105,075	1	188105,075	8341,762	0,00
Tepelná úprava	2669,004	3	889,668	39,453	0,00
Chyby	3202,072	142	22,550		

Význam byl přijat na $P < 0,01$

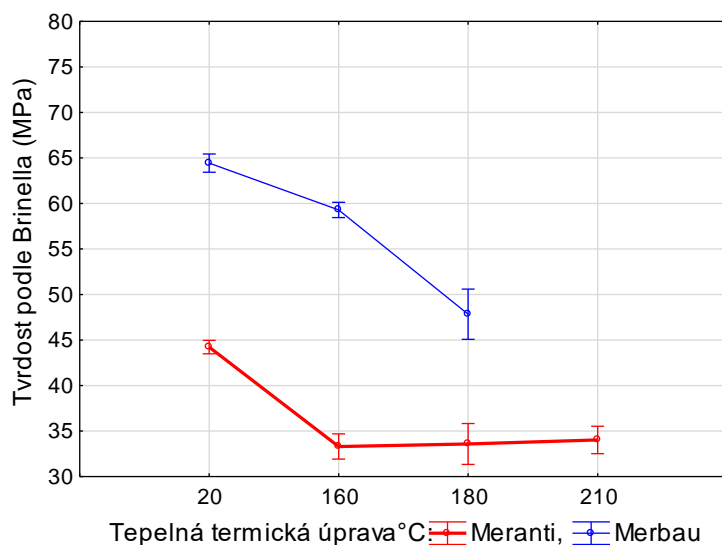
V tabulce 15 jsou uvedena statistická hodnocení vlivu termické modifikace na hodnoty tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Merbau. Z tabulky je zřejmé, že i u dřeviny Merbau je teplota termické modifikace faktor významně ovlivňující hodnoty tvrdosti dřeva.

Tab. 15 **Statistické hodnocení vlivu faktorů tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Merbau**

Sledované faktory	Suma čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F-test	P–hladina významnosti
Intercept	335142,531	1	335142,531	15349,441	0,000
Tepelná úprava	4477,894	2	2238,947	102,543	0,000
Chyby	2248,921	103	21,834		

Význam byl přijat na $P < 0,01$

Na obrázku 18 je viditelné srovnání tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Meranti a Merbau. Z obrázku je patrné, že Meranti má nižší hodnoty tvrdosti než Merbau. Dále je evidentní, že u dřeviny Merbau s nárůstem teploty termické modifikace klesají hodnoty tvrdosti, zatímco u dřeviny Meranti jsme pokles mezi hodnotami naměřenými při teplotách 160 °C, 180°C a 210 °C nenaměřili.



Obr. 18 Srovnání tepelného zpracování tvrdosti podle Brinella pro dřevinu Meranti (Shorea) a Merbau (Intsia)

V tabulce 16 jsou uvedena srovnání účinků jednotlivých faktorů při použití Duncanova testu na hodnotách tvrdosti podle Brinella. Z tabulky je zřejmé, že u dřeviny Meranti, která byla upravena teplotou 160°C, 180°C a 210°C, měly změny teploty významný vliv. U dřeviny Merbau, která byla upravena teplotou 160°C a 180°C, neměly změny teploty významný vliv.

Obr. 19 Srovnání sledovaného faktoru při použití Duncanovo testu na hodnotách tvrdosti podle Brinella

Meranti Brinellova metoda H_{BW} (MPa)					
Tepelná úprava (°C)		(1) 44.227	(2) 33.305	(3) 33.582	(4) 34.029
Meranti	20		0.000	0.000	0.000
Meranti	160	0.000		0.806	0.548
Meranti	180	0.000	0.806		0.691
Meranti	210	0.000	0.548	0.691	
Merbau Brinellova metoda H_{BW} (MPa)					
Tepelná úprava (°C)		(1) 81.923	(2)	(3)	(4)
Merbau	20		0.000	0.000	-
Merbau	160	0.000		0.000	-
Merbau	180	0.000	0.000		-
Merbau	210	-	-	-	-

7 Závěr

V této bakalářské práci jsou shrnuty současné poznatky v oblasti modifikace dřeva a jeho termické úpravy. Hlavním cílem této bakalářské práce bylo porovnání vybraných fyzikálních a mechanických vlastností vybraných dřevin, zkoumanými dřevinami byly Meranti a Merbau, které byly tepelně modifikovány. K tomuto účelu byly vytvořeny skupiny vzorků, které byly od sebe odlišeny teplotou modifikace. Jednotlivé stupně modifikace byly rozděleny na teploty 160°C, 180°C a 210°C. U takto upravených vzorků byl sledován vliv termické úpravy materiálu na změnu barvy. Z mechanických vlastností byly vzorky zkoušeny na statickou tvrdost metodou podle Brinella. Zajímavé jsou zjištěné výsledky tvrdosti podle Brinella. U všech posuzovaných dřevin došlo k poklesu tvrdosti. Zatímco v ThermoWood Handbook (2003) je uvedeno, že se zvyšujícími se teplotami ošetření se zvyšuje rovněž tvrdost dřeva (zkoušeno dle EN 1534 – tvrdost podle Brinella). Avšak je zde zároveň doplněno, že relativní změna je velmi malá a že tvrdost velmi výrazně závisí na hustotě.

Jak pro Meranti, tak pro Merbau platí, že se zvyšující se teplotou modifikace se snižuje rovnovážná vlhkost.

Z bakalářské práce je zřejmé, že u dřeviny Meranti, která byla upravena teplotou 160°C, 180°C a 210°C, měly změny teploty významný vliv. U dřeviny Merbau, která byla upravena teplotou 160°C a 180°C, neměly změny teploty významný vliv.

K hodnocení kvality byly vybrány parametry, kterými jsou barva dřeva a statická tvrdost.

Termická úprava v intervalu 160–210°C výsledné parametry zkoumaných veličin vždy zhorší. Působení vysokých teplot na dřevo má za následek změny jeho chemické struktury a v souvislosti s tím i změny jeho mechanicko-fyzikálních vlastností. Vždy je však snahou pomocí optimalizace působících podmínek a přesným řízením celého procesu získat materiál s nižší hygroskopicitou, vyšší rozměrovou stabilitou, vyšší odolností proti dřevokazným a dřevozbarvujícím houbám a plísním, vyšší odolností vůči dřevokaznému hmyzu, s atraktivní barvou a zároveň materiál, u kterého nedojde k příliš velkému zhoršení mechanických vlastností. U mechanických vlastností takto modifikovaného dřeva nastávají časté problémy.

Stejně tak zlepšení rozměrové stability a snížení hygroskopicity dřeva se shoduje s výše uvedenou literaturou – dosažení největší rozměrové stability je při ztrátě hmoty 10–20 % Hill (2006), ThermoWood Handbook (2003) a další.

Uvedená zjištění jsou také výrazně ovlivněna jednak různým tepelným ošetřením těchto dřevin a jednak tím, že nebyly známy hodnoty mechanicko-fyzikálních vlastností před tepelným ošetřením dřeva Meranti a Merbau.

Po tepelném ošetření těchto dřevin však došlo k velmi výrazným změnám a obecně lze tedy říci, že mnou zjištěné výsledky se shodují se skutečnostmi, které jsou uváděny v diskutované literatuře. Konečné vlastnosti závisí největší měrou na vstupním materiálu a na tom, jak je proces optimalizován a řízen.

V této bakalářské práci najdeme výsledky, které doplňují současné znalosti zpracování termicky upraveného dřeva. Tyto výsledky najdou využití jak pro vědu, tak i pro praxi. Použití v praxi takto upravených materiálů by se dalo předpokládat v průmyslových odvětvích, stavebnictví a nábytkářství. Díky zvýšené odolnosti proti působení vlhkosti může být tato technologie v budoucnu použita v oblastech, kde budou tyto materiály vystaveny extrémnějším vlhkostním podmínkám.

Z výsledků plyne, že tento materiál nelze doporučit na nosné konstrukce. Pro vyslovení nějakých jednoznačných závěrů, by však bylo třeba provést mnohem více zkoušek tohoto materiálu.

Závěrem je nutno podotknout, že dřevo je přírodní nehomogenní materiál a na jeho kvalitu má velký vliv jeho stavba i konkrétní podmínky zpracování.

8 Seznam literatury a použitých zdrojů

- DEJMAL, ALEŠ Sušení a modifikace dřeva. Učební text, MENDELU v Brně, 2009.
- HILL, C. A. M. Wood modification: chemical, thermal, and other processes. 1. vyd. Chichester: England : John Wiley & Sons, 2006. 239 s.
- CHUCHRJANSKIJ, P. N. Zušľachťovanie dreva: lisovanie dreva. Bratislava: Práca, 1953. 156 s.
- HRÁZSKÝ, Jaroslav; KRÁL, Pavel. Využití nového materiálu ThermoWood. Materiály pro stavbu. 2005, 1, s. 27-29. Dostupný také z WWW: <<http://www.prokom.cz/thermowood-tepelne-upravene-drevo/vyuziti-novehomaterialu-thermowood.pdf>>.
- KŘUPALOVÁ, Z.; Nauka o materiálech, Sobotáles, Praha, 1999, 238s., ISBN 80-85920-57-3
- GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J.; Nauka o dřevě MZLU v Brně, Brno 1996, 176s., ISBN 80-7157-194-6
- HORÁČEK, P.; Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. MZLU v Brně, Brno 1998, 124 s., ISBN 80-7157-347-7
- MATOVÍČ, A.: Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva, MZLU v Brně, Brno 1993, 212s., ISBN 80-7157-086-9
- POŽGAJ, Alexander, et al. Štruktúra a vlasnosti dreva. 1. vyd. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- REINPRECHT, L.; Ochrana dreva. 1. vyd. Zvolen: Vydateľstvo technickej univerzity vo Zvolene, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.
- REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ, Z.; 2008. Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.
- REINPRECHT, L.; VIDHOLDOVÁ, Z.; Termodrevo vyd. Zvolen: Vydateľstvo technickej univerzity vo Zvolene, 2011. 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7.
- WAGENFÜHR, Rudi. Dřevo - obrazový lexikon. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2002. 348 s. ISBN 80-247-0346-7.
- Tepelně upravené dřevo: Suroviny. V: www.prokom.cz [online]. [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://www.prokom-sr.sk/thermowood-tepelne-upravene-drevo/surovinytepelne-upravene-drevo-thermowood.pdf>

Tepelně upravené dřevo: ThermoWood. COPYRIGHT © 2010 - 2015 SVĚTDŘEVA.
Svět dřeva: terasy - podlahy - pergoly [online]. 2010 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z:
<http://svetdreva.com/nabidka/materialy/thermowood>.

ThermoWood. V: MT nábytek.cz [online]. 2011 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z:
<http://www.mt-nabytek.cz/slovník-pojmu/461-thermowood-.htm>

Vše o Thermowoodu: Co je to Thermowood. V: www.pechar.cz [online]. 2015 [cit. 2015-02-22]. Dostupné z: <http://www.pechar.cz/thermowood>

Výrobní proces ThermoWood: tepelně upravené profily. V: [Www.prokom.cz](http://www.prokom.cz) [online].
Opava, 2013 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.prokom.cz/tepelne-upravenedrevo-thermowood/128-drevene-profily-tepelne-upravene-specialni-technologieithermowood>

Normy:

1. ČSN 49 0108. Dřevo: Zisťovanie hustoty. Praha: ÚNM,1993. 5 s
2. ČSN 49 0110.Dřevo: Medza pevnosti v tlaku v smere vláknien. Praha: ÚNM,1980. 3 s.

Webové stránky:

1. <http://www.finnforest.cz/produkty/thermowood/Pages/interieroveprodukty.aspx>
2. <http://www.finnforest.com/>

9 Přílohy

1. CD médium – bakalářská práce v elektronické podobě