

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE**  
**FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ**

**OHYBOVÉ CHARAKTERISTIKY TERMICKY  
MODIFIKOVANÝCH TROPICKÝCH DŘEVIN**

**2019**

**Bc. Michal KROUPA**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**OHYBOVÉ CHARAKTERISTIKY TERMICKY  
MODIFIKOVANÝCH TROPICKÝCH DŘEVIN**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:

Dřevařské inženýrství

Pracoviště (katedra/ústav):

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Praha 2019

**Bc. Michal KROUPA**





"Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma «**Ohybové charakteristiky termicky modifikovaných tropických dřevin**» vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, Ph.D. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č.111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby."

V..... dne.....

.....

Michal Kroupa

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za vedení, trpělivost, vstřícný a milý přístup, poskytnutí studijních materiálů, důležitých rad a odbornou pomoc při zpracování této diplomové práce a za čas, který mi po celou dobu řešení práce věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří jakkoliv přispěli k vypracování mé diplomové práce. Velké díky patří také mým rodičům, celé rodině, přátelům a legendám, kteří mě během celého studia aktivně podporovali a kolegům z katedry zpracování dřeva a biomateriálů.

## Abstrakt

Díky pozitivním vlastnostem (trvanlivost, barevná stálost, odolnost proti povětrnostním vlivům, atd.), termicky modifikovaného dřeva se jeho využití jako konstrukční element dřevěných staveb stále zvyšuje. Pokud je dřevo použito jako konstrukční prvek, tak je vystaven mechanickému namáhání a povětrnostním vlivům. Nejčastější mechanické napětí, které se vybaví jako první, je ohyb.

V závislosti na použití materiálu mohou být použity různé charakteristiky, které udávají ohebnost materiálu. Důležitými vlastnostmi jsou síla na mezi úměrnosti „ $F_E$ “, průhyb na mezi úměrnosti „ $Y_E$ “, síla na mezi pevnosti v ohybu „ $F_P$ “ a průhyb na mezi pevnosti v ohybu „ $Y_P$ “.

Vzhledem k tomu, že pružnost materiálu závisí také na tloušťce materiálu, je vhodné vyjádřit ohebnost poměrem tloušťky materiálu k nejmenšímu dosažitelnému poloměru ohybu. Pro tento účel jsme použili analýzu vlastností pomocí charakteristik určujících minimální poloměr ohybu „ $R_{min}$ “ a koeficient ohybatelnosti „ $K_{oh}$ “.

Tyto charakteristiky byly určeny pro tepelně modifikované dřeviny iroko (*Milicia excelsa*) a padouk (*Pterocarpus soyauxii*) se zaměřením na určení vlivu různých teplot termické modifikace (160, 180, 210 °C). Výsledky naměřené v těchto zkušebních vzorcích byly porovnány s výsledky naměřeného souboru vzorků, které nebyly podrobeny termické modifikaci (20 °C). Všechny soubory vzorků byly porovnány se vzorky, které byly mražené na teploty -10 °C a -20 °C po dobu jednoho týdne.

## Klíčová slova:

iroko, padouk, thermowood, koeficient ohybatelnosti, minimální poloměr ohybu, síla na mezi úměrnosti, průhyb na mezi úměrnosti, síla na mezi pevnosti

## Abstract

Thanks to its positive properties (weather resistance, color stability, durability, etc.), thermally modified wood is increasingly used as a structural element in wooden building. In these structures, it is exposed to mechanical stress in addition to weathering effects. The mechanical stress that most commonly comes to mind is bending stress.

Depending on the use of the material, different material characteristics that are telling of the bendability of the material can be used. Important characteristics include the force at the limit of proportionality „ $F_E$ “, the deflection at the limit of proportionality „ $Y_E$ “, the force of the modulus of rupture „ $F_P$ “ and the deflection at the modulus of rupture „ $Y_P$ “.

Since the flexibility also depends on the thickness of the material, it is appropriate to express the bendability by a ratio of the thickness of the material to the smallest achievable bend radius. For this purpose, we used an analysis of the properties, using characteristic determining the minimum bend radius „ $R_{min}$ “ and the coefficient of bendability „ $K_{bend}$ “.

These characteristics were determined for thermally modified woods iroko (*Milicia excelsa*) and padauk (*Pterocarpus soyauxii*), focusing on determining the effects of different temperatures used in the thermal modification (160, 180, 210 °C). The results measured in these test specimens were compared with the result measured in a set of test specimens not subjected to thermal modification (20 °C). All sets were compared with wood species which were frozen in temperature -10 °C and -20 °C for one week.

## Keywords

iroko, padauk, thermowood, coefficient of bendability, minimum bend radius, force at the limit of proportionality, deflection at the limit of proportionality, force at the modulus of rupture



# Obsah

<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam grafů .....</b>	<b>13</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>14</b>
<b>Cíl práce.....</b>	<b>16</b>
<b>Teoretický rozbor literárních poznatků .....</b>	<b>17</b>
<b>1 Mechanické vlastnosti dřeva .....</b>	<b>18</b>
1.1 Pevnost dřeva .....	18
1.2 Pružnost dřeva.....	19
1.3 Průhyb a síla na mezích úměrnosti a pevnosti .....	20
1.4 Minimální poloměr ohybu a koeficient ohybatelnosti.....	21
<b>2 Modifikace dřeva .....</b>	<b>22</b>
2.1 Mechanická modifikace dřeva .....	23
2.1.1 Lisování .....	23
2.2 Modifikace působením energií.....	23
2.3 Modifikace kombinací materiálů .....	23
2.4 Chemická modifikace dřeva .....	24
2.4.1 Acetylace .....	24
2.4.2 Modifikace čpavkem .....	24
2.4.3 Modifikace impregnací.....	25
2.5 Hydrotermická modifikace dřeva.....	25
2.6 Termická modifikace dřeva .....	26
<b>3 Termická modifikace dřeva.....</b>	<b>27</b>
3.1 Podstata a cíle termické modifikace dřeva .....	30
3.2 Vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.....	32
3.3 Způsoby termické modifikace.....	34
3.3.1 ThermoWood® .....	34
3.3.2 Rétification .....	35
3.3.3 Plato®Wood .....	35
3.3.4 OHT.....	36
3.4 Termická modifikace v atmosféře vzduchu.....	37
<b>4 Charakteristika vybraných dřevin.....</b>	<b>40</b>

4.1	Iroko .....	40
4.1.1	Popis dřeva iroko .....	40
4.2	Padouk .....	41
4.2.1	Popis dřeva padouk .....	41
4.3	Vlastnosti dřevin iroko a padouk .....	42
	<b>Praktická část .....</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>Metodika .....</b>	<b>43</b>
<b>6</b>	<b>Metodika experimentální práce.....</b>	<b>44</b>
6.1	Příprava a značení zkušebních těles .....	44
6.2	Termická modifikace zkušebních těles.....	46
6.3	Experimentální měření .....	49
6.4	Výpočet zkoumaných charakteristik .....	50
<b>7</b>	<b>Výsledky experimentu .....</b>	<b>52</b>
7.1	Iroko .....	52
7.2	Padouk .....	62
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>72</b>
	<b>Seznam použité literatury a zdrojů .....</b>	<b>74</b>
	<b>Normy .....</b>	<b>77</b>

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Pracovní diagram .....	19
Obrázek 2 - Silově průhybový diagram při namáhání ohybem a určování meze úměrnosti a meze pevnosti .....	20
Obrázek 3 - Ukázka použití termicky modifikovaného dřeva .....	30
Obrázek 4 - Schématické znázornění změn složek dřeva v důsledku vyšších teplot bez ohledu na čas .....	31
Obrázek 5 - Změna modulu pevnosti a modulu pružnosti v čase při působení vyšších teplot .....	32
Obrázek 6 - Sorpční a desorpční vlastnosti nemodifikovaného dřeva (vlevo) a modifikovaného v atmosféře dusíku při 250 (°C) po dobu dvou hodin	33
Obrázek 7 - Ukázka využití ThermoWood® .....	34
Obrázek 8 - Dřevo smrku neupravené, upravené Plato® procesem, časem zešednutí povrchu upraveného dřeva .....	36
Obrázek 9 - Impregnační nádoby procesu OHT a ukázka použití OHT dřeva.....	37
Obrázek 10 - Fáze termické modifikace .....	38
Obrázek 11 - Ukázka dřeviny iroko .....	41
Obrázek 12 - Ukázka dřeviny padouk a výrobku z něj .....	42
Obrázek 13 - Tvar a rozměry zkušebních těles .....	44
Obrázek 14 - Zkušební vzorky iroko před termickou modifikací.....	45
Obrázek 15 - Zkušební vzorky padouku před termickou modifikací.....	45
Obrázek 16 - Rozložení vzorků iroko v termovací komoře .....	46
Obrázek 17 - Ukázka barevných změn u všech teplot modifikace vybraných dřevin .....	48
Obrázek 18 - Princip zkoušky tří-bodového ohybu .....	49
Obrázek 19 - Testovací zařízení FPZ 100 pro tří-bodový ohyb	50

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Způsoby termické modifikace .....	34
Tabulka 2 - Třídy Thermo Wood a jejich teploty modifikace .....	38
Tabulka 3 - Změna vlastností tříd Thermo Wood .....	38
Tabulka 4 - Vlastnosti a trvanlivosti dřevin iroko a padouk .....	42
Tabulka 5 - Vstupní technologické parametry .....	47
Tabulka 6 - Časy modifikace jednotlivých teplot u dřeviny iroko .....	48
Tabulka 7 - Časy modifikace jednotlivých teplot u dřeviny padouk .....	48
Tabulka 8 - Střední hodnoty $Y_E$ , $Y_P$ , $F_E$ , $F_P$ a hustoty pro dřevinu iroko .....	52
Tabulka 9 - Procentuální vyjádření změn naměřených charakteristik .....	52
Tabulka 10 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $Y_E$ dřeviny iroko .....	53
Tabulka 11 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $Y_P$ dřeviny iroko .....	54
Tabulka 12 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $F_E$ dřeviny iroko .....	55
Tabulka 13 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $F_P$ dřeviny iroko .....	56
Tabulka 14 - Střední hodnoty $R_{minB}$ , $R_{minC}$ , $K_{ohB}$ , $K_{ohC}$ a hustoty pro dřevinu iroko .....	57
Tabulka 15 - Procentuální vyjádření změn naměřených charakteristik .....	57
Tabulka 16 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $R_{minbB}$ dřeviny iroko .....	58
Tabulka 17 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $R_{minC}$ dřeviny iroko .....	59
Tabulka 18 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $K_{ohB}$ dřeviny iroko .....	60
Tabulka 19 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $K_{ohC}$ dřeviny iroko .....	61
Tabulka 20 - Střední hodnoty $Y_E$ , $Y_P$ , $F_P$ , $F_E$ a hustoty pro dřevinu padouk .....	62
Tabulka 21 - Procentuální vyjádření změn naměřených charakteristik .....	62
Tabulka 22 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $Y_E$ dřeviny padouk .....	63
Tabulka 23 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $Y_P$ dřeviny padouk .....	64
Tabulka 24 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $F_E$ dřeviny padouk .....	65
Tabulka 25 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $F_P$ dřeviny padouk .....	66
Tabulka 26 - Střední hodnoty $R_{minB}$ , $R_{minC}$ , $K_{ohB}$ , $K_{ohC}$ a hustoty pro dřevinu padouk .....	67
Tabulka 27 - Procentuální vyjádření změn naměřených charakteristik .....	67
Tabulka 28 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $R_{minB}$ dřeviny padouk .....	68
Tabulka 29 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $R_{minB}$ dřeviny padouk .....	69

Tabulka 30 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $K_{ohB}$ dřeviny padouk .....	70
Tabulka 31 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících $K_{ohC}$ dřeviny padouk .....	71

## Seznam grafů

Graf 1 - Průběh termické modifikace dřeviny iroko .....	47
Graf 2 - Průběh termické modifikace dřeviny padouk .....	47
Graf 3 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $Y_E$ dřeviny iroko .....	53
Graf 4 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $Y_P$ dřeviny iroko .....	54
Graf 5 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $F_E$ dřeviny iroko .....	55
Graf 6 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $F_P$ dřeviny iroko .....	56
Graf 7 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $R_{minB}$ dřeviny iroko .....	58
Graf 8 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $R_{minC}$ dřeviny iroko .....	59
Graf 9 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $K_{ohB}$ dřeviny iroko .....	60
Graf 10 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $K_{ohC}$ dřeviny iroko .....	61
Graf 11 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $Y_E$ dřeviny padouk .....	63
Graf 12 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $Y_P$ dřeviny padouk .....	64
Graf 13 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $F_E$ dřeviny padouk .....	65
Graf 14 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $F_P$ dřeviny padouk .....	66
Graf 15 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $R_{minB}$ dřeviny padouk .....	68
Graf 16 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $R_{minC}$ dřeviny padouk .....	69
Graf 17 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $K_{ohB}$ dřeviny padouk .....	70
Graf 18 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot $K_{ohC}$ dřeviny padouk .....	71

---

## Úvod

Dřevo nás díky svým jedinečným vlastnostem provází od nepaměti a jeho využití se stále zvyšuje díky jeho obnovitelnosti. Vlastnosti dřeva jsou však pro každý druh jedinečné a tyto vlastnosti ovlivňují jeho použití. Důležitými vlastnostmi dřeva jsou přirozená trvanlivost v exteriérových a interiérových expozicích, jeho opracovatelnost při zpracování, a mechanické a fyzikální vlastnosti. Díky těmto vlastnostem se hlavně využívá v truhlářské výrobě a ve stavebnictví. Také se oceňuje jeho vysoká pevnost v poměru s jeho nízkou objemovou hmotností a jeho pružnost.

I přes vysoký počet pozitivních vlastností dřeva má ale neupravené dřevo i spoustu nevýhod, které způsobují komplikace v jeho budoucím použití. Těmito nevýhodami jsou například nestabilita rozměrů v důsledku sesychání a bobtnání a u některých dřevin malá odolnost vůči působení vnějších vlivů. Aby byly tyto a jiné nevýhody redukovány, až eliminovány, a aby požadované pozitivní vlastnosti dřeva byly zachovány, začalo se dřevo modifikovat různými metodami.

Jak říká Sandberg a Navi (2012), smyslem jakéhokoli technologického vývoje zahrnující dřevo je standardizace, homogenizace, a produkování nových materiálů na bázi dřeva s dimenzováním, které je nezávislé na rozměrech stromu, které mají sníženou anizotropii, eliminované problémy s rozměrovou nestabilitou a zvýšenou trvanlivost a odolnost proti ohni. Možnosti, jak takového výrobku dosáhnout jsou transformace (řezáním, štěpkováním, rozvlákňováním), rekonstituce (výroba materiálů na bázi dřeva ze dřeva, třísek, štěpek a částic) a modifikace.

Modifikace dřeva je způsob úpravy dřeva, jejíž cílem je zachování pozitivních vlastností. Snažíme se tedy zachovat a vylepšit pozitivní vlastnosti dřeva jako je například snížení anizotropie a zvýšení odolnosti proti hoření, za současné eliminace negativních vlastností, jako je například snížení hygroskopicity a zvýšení odolnosti proti dřevokaznému nebo dřevo zbarvujícímu hmyzu, ale také proti plísním a houbám.

Metod modifikace dřeva existuje více, ale tématem této práce je termická úprava tropických dřevin a jejich ohybové charakteristiky v závislosti na tepelné modifikaci.

Termická modifikace dřeva je způsob modifikace, který probíhá za působení vysokých teplot a při této modifikaci dochází k změně fyzikálních, mechanických a chemických vlastností dřeva.

---

Výhodou této metody je její zdravotní nezávadnost a šetrnost k životnímu prostředí. Dalšími klady tepelně upraveného dřeva je snížení náchylnosti na bobtnání a sesychání, což je zapříčiněno redukcí hydroxylových skupin, které jsou při působení tepla redukovány. To znamená, že je zvýšena rozměrová stálost. Nezanedbatelnou výhodou této metody je také zvýšení odolnosti proti biologickým činitelům.

Avšak i tato metoda má své nevýhody. Dřevo modifikované touto metodou ztrácí svoji pevnost a bývá křehčí. Další možnou nevýhodou je tmavnutí dřeva při této modifikaci, jež nemusí být žádoucí u některých druhů dřevin v závislosti na konečném použití (Hill 2006; Reinprecht a Vidholdová 2008)

Termická modifikace nemá však pouze jeden způsob výroby. Každý proces se liší v použití média pro přenos tepla. Někdo používá pro přenos tepla atmosféru vzduchu a páry, jiný zase oleje. Další rozdíly jsou u samotného procesu, kdy se výsledný produkt liší na základě zvolené teploty termické modifikace a času modifikování. Tyto parametry ovlivňují fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti.

Na téma termická úprava dřeva existují již odborné práce a výzkumy, nicméně informace ohledně termicky upravovaného tropického dřeva nejsou tolik známé, přestože je tato znalost důležitá pro jeho využití. Pro tuto práci a experiment byly vybrány tropické dřeviny iroko (*Milicia excelsa*, *Milicia regia*) a padouk (*Pterocarpus soayauxii*).

Při termické modifikaci se mění mechanické vlastnosti, a proto je důležité tyto vlastnosti zkoumat a měřit, aby se dalo určit jeho využití. V této práci je výzkum zaměřen na zkoumání charakteristik na mezi úměrnosti a pevnosti, konkrétně na síly a průhyb v těchto mezích, Dále na minimální poloměr ohybu a koeficient ohybu.



---

## Cíl práce

Cílem práce je zjištění vlivu termické modifikace na vybrané ohybové charakteristiky termicky modifikovaných tropických dřevin iroko (*Milicia excelsa*) a padouk (*Pterocarpus soyauxii*).

Cíl práce jsme rozdělili do několika bodů:

1. Zjištění vlivu teploty (20, 160, 180 a 210 °C) termické modifikace na ohybové charakteristiky dřeva u vybraných druhů exotických dřevin.
2. Experimentální stanovení vybraných ohybových charakteristik.
3. Porovnání a zhodnocení vlivu teploty termické modifikace a druhu dřeviny na vybrané ohybové charakteristiky a celkové zhodnocení interakce sledovaných faktorů na vybrané charakteristiky.

Navrhnutá metodika práce je orientovaná na analýzu problematiky vlivu stupně termické modifikace na změny ohybových charakteristik vybraných exotických dřevin.

---

## **Teoretický rozbor literárních poznatků**

Z názvu práce je zřejmé, že je práce zaměřena na mechanické vlastnosti upraveného dřeva, v našem případě na ohybové charakteristiky termicky modifikovaných tropických dřevin, tudíž teoretický rozbor se v první řadě zaměří na mechanické vlastnosti, konkrétně ohyb, a dále bude rozbor modifikací dřeva se zaměřením na termickou modifikaci a stručný popis použitých exotických dřevin.

---

# 1 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanickými vlastnostmi dřeva se rozumí schopnost dřeva čelit účinkům vnějších sil. Tyto síly mohou působit staticky (síla pomalu a plynule narůstá), rázově (působení síly jednorázově a maximální hodnotou), kmitavě (směr a intenzita síly se mění) a trvale (dlouhodobé působení síly).

Mechanické vlastnosti se třídí do tří skupin a ty jsou:

1. Základní-pevnost, pružnost, houževnatost, plastičnost.
2. Odvozené-tvrdość, odolnost proti trvalému zatížení, odolnosti proti únavovému zlomu, odolnosti proti tečení.
3. Technologické-šťípatelnost, opotřebovatelnost.

Pružnost a pevnost jsou nejvíce oceňovanými mechanickými vlastnostmi dřeva.

Všechny tyto vlastnosti jsou ovlivněny faktory, jako je druh materiálu, hustota, vlhkost, teplota, směr vláken, rozměry, velikost působící síly, doba trvání jejího působení a další. V dnešní době víme, že všechny materiály jsou deformovány působením sil, ať už je to kvůli aplikovanému vnějšímu napětí, vnitřnímu namáhání vlhkostí nebo vlastní teploty (Bodig a Jayne 1982; Wiemann 2010; Gaff a kol. 2015; 2016; 2017).

Různost mechanických vlastností v objemu dřeva a závislost na směru se nazývá anizotropie mechanických vlastností (Požgaj 1997). Příčinou anizotropie ve dřevě je vliv stavby dřeva na všech úrovních. Těmito úrovněmi jsou makroskopická, mikroskopická, submikroskopická a chemická.

Pro charakteristiku mechanických vlastností se uvažují tři roviny pružné symetrie:

1. příčná rovina (RT).
2. radiální rovina (LR).
3. tangenciální rovina (LT) (Požgaj 1997; Gandelová 2012).

## 1.1 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva je schopnost dřeva klást odpor proti síle působící z vnějšku, která má vyvolat trvalé porušení. Vyjadřuje se napětím, při kterém se poruší celistvost dřeva – napětí na mezi pevnosti ( $\sigma_p$ ).

Rozlišujeme pevnost dřeva v tlaku, tahu, smyku a ohybu.

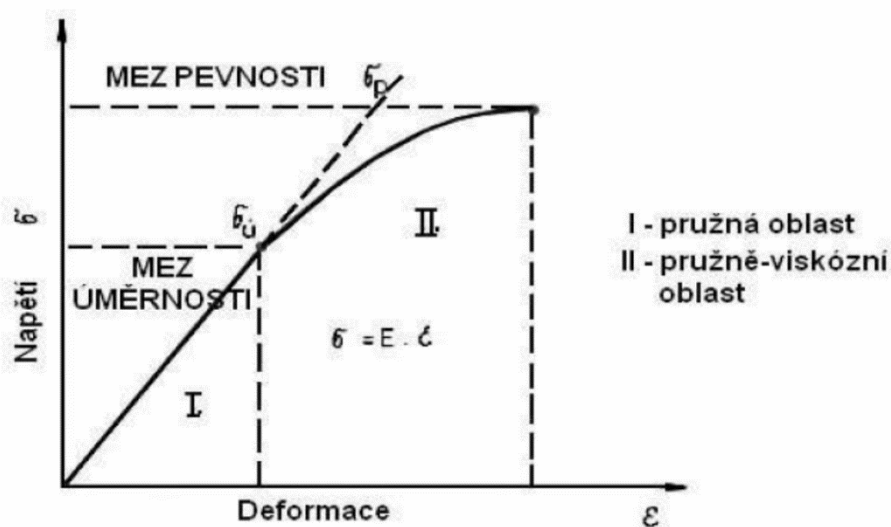
## 1.2 Pružnost dřeva

Pružnost dřeva je definována jako schopnost dřeva nabývat původní tvar a rozměry po předchozím působení síly, které vyvolalo deformaci. Z fyzikálního hlediska je pružnost takový stav, kdy jsou vzdálenosti mezi atomy vyvolané působením předchozích sil vratné po odstranění vnějších působících sil (Požgaj 1997).

Pružnost dřeva se dá vyjádřit charakteristikami:

1. Moduly pružnosti ( $E$ ,  $G$ ),
2. Poissonovými čísly ( $\mu$ ),
3. Mezi úměrnosti ( $\sigma_u$ ),
4. Pružnou deformací ( $\varepsilon_p$ ),
5. Energií pružné deformace ( $W_p$ ).

Mez úměrnosti a pružné deformace jsou nejlépe patrné z obecného pracovního diagramu (Požgaj 1997).



Obrázek 1 - Pracovní diagram dle Požgaje 1997

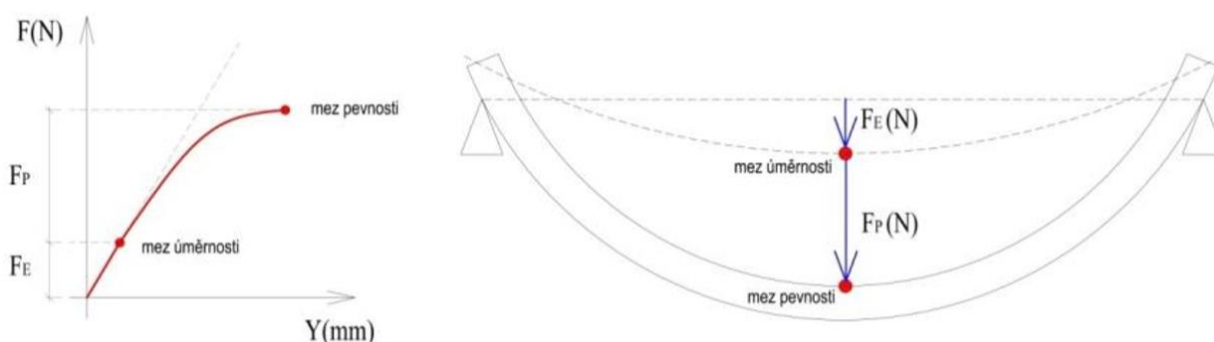
Pracovní diagram je empirická křivka, která charakterizuje vztah mezi napětím a deformací. Tento diagram se rozděluje na dvě části.

První část lineární je po mez úměrnosti ( $\sigma_u$ ) a druhá část nelineární je po mez pevnosti ( $\sigma_p$ ). Na mez úměrnosti končí pružné deformace, resp. deformace pružné v čase a je to hranice nejvyššího napětí ve dřevě, kdy nevznikají plastické deformace (Požgaj 1997). Po ukončení působení síly na těleso deformace zanikají a těleso se vrací do původního stavu.

Pokud napětí stoupne nad mez úměrnosti, vznikají deformace plastické. Tyto deformace po zániku působení vnějších sil nemizí. Pokud působící napětí překročí mez pevnosti, dojde k porušení celistvosti tělesa. Mez pevnosti je tedy hraniční hodnotou napětí, kdy dřevo odolává působení vnějšího napětí, aniž by se porušila jeho celistvost.

### 1.3 Průhyb a síla na mezích úměrnosti a pevnosti

Průhyb na mezi úměrnosti se charakterizuje jako hranice, za kterou vznikají deformace plastické. Síla na mezi úměrnosti je potřebná síla k dosažení průhybu na mezi úměrnosti. Síla na mezi úměrnosti je síla, kterou je možné aplikovat na dřevo, aniž by se vyskytly trvalé deformace. Průhyb na mezi pevnosti se charakterizuje jako moment, kdy dojde k porušení materiálu, a síla na mezi pevnosti je síla, kterou je potřebné aplikovat pro dosažení průhybu na mezi pevnosti (Mackes a Lynch 2001; Gaff a kol. 2016). Tyto charakteristiky jsou měřeny v této práci.



Obrázek 2 - Silově průhybový diagram při namáhání ohybem a určování meze úměrnosti a meze pevnosti (Svoboda a kol. 2017)

Dalšími měřeními charakteristikami je minimální poloměr ohybu  $R_{min}$ , který je definován jako minimální poloměr ohybu, kdy nedojde k porušení materiálu, a koeficient ohýbatelnosti  $K_{oh}$ , který je kvantitativní charakteristikou popisující ohýbatelnost dřeva, a který je daný poměrem tloušťky ohýbaného materiálu  $h$  a minimálního poloměru  $b$  (Gaff a kol. 2016).

---

## **1.4 Minimální poloměr ohybu a koeficient ohybatelnosti**

O charakteristikách minimální poloměr ohybu a koeficient ohýbatelnosti existuje velmi málo vědeckých poznatků, ale Gaff a kol. (2015) uvádí, že s narůstající tloušťkou materiálu klesá hodnota koeficientu ohybatelnosti a stoupá síla potřebná pro ohýbání.

Gaff a kol. (2015) vytvořili model pro analýzu ohybnosti. Díky tomuto modelu je možné definovat správné vztahy pro určení minimálního poloměru ohybu, který je pak možné použít pro výpočet koeficienty ohybnosti.

---

## 2 Modifikace dřeva

Dřevo je přírodní materiál, tudíž jsou jeho vlastnosti ovlivněny okolními vlivy prostředí, ve kterém roste. Jak již bylo zmíněno, dřevo má své klady i zápory, které se snažíme ovlivnit modifikací.

Hlavními klady dřeva jsou jeho obnovitelnost, velmi dobré mechanické vlastnosti v poměru s jeho vahou, vysoká pevnost v tlaku, pružnost, opracovatelnost, malá tepelná roztažnost, což je velká výhoda v ohledu na požární bezpečnost konstrukcí a další.

Mezi nevýhody se řadí anizotropní charakter dřeva, heterogenita, hygroskopicitu, z čehož vychází bobtnání a sesychání (nestabilita rozměrů) a nízká odolnost proti biotickým a abiotickým činitelům.

Cílem modifikace dřeva je zachování jeho pozitivních vlastností, zvýšením trvanlivosti a prodloužení životnosti výrobků ze dřeva a zároveň eliminace negativních vlastností. Na výrobu modifikovaného dřeva se používají především druhy méně trvanlivých dřevin z důvodu dosažení stejných, někdy i lepších vlastností a trvanlivosti, než mají některé druhy tropických dřevin (Reinprecht a Vidholdová 2008).

K tomu, abychom dosáhli lepších vlastností a delší životnosti výrobků ze dřeva, je nutné, aby byla použita správná metoda modifikace. Trvanlivost a vlastnosti dřeva je možné zlepšit několika druhy modifikací:

1. Mechanická modifikace dřeva.
2. Modifikace působením energií.
3. Modifikace kombinací materiálů.
4. Chemická modifikace dřeva.
5. Hydrotermická modifikace dřeva.
6. Termická modifikace dřeva.
7. Kombinace více druhů výše zmíněných metod.

V současnosti se do popředí dostávají metody modifikace dřeva, kdy se stále více klade důraz na to, aby byl co nejmenší dopad na životní prostředí, aby byl výrobek ekologicky nezávadný, snadno zlikvidovatelný apod. Tyto požadavky docílíme použitím termické modifikace dřeva a takto modifikované dřevo nazýváme termodřevo (ThermoWood®).

---

## **2.1 Mechanická modifikace dřeva**

Mechanickou modifikací dřeva je modifikace působením vnějších mechanických sil. Provádí se působením tlakem, díky němuž se zvýší hustota dřeva a tím se zlepší jeho mechanické vlastnosti a odolnost vůči mechanickému poškození. Tento způsob mechanické modifikace se nazývá lisování.

### **2.1.1 Lisování**

Lisování je proces, při kterém na dřevo působí vnější mechanická síla v čase, která vyvolává trvalé deformace dřeva, ale musí se dbát na nepřekročení meze pevnosti dřeva, jinak dojde k porušení buněčné struktury a tím se znehodnotí požadovaný výsledek procesu. Díky tomuto procesu se zvýší hustota dřeva a s tím dojde ke zvýšení mechanických vlastností.

Samotný proces lisování je energetický náročný, a pro snížení potřebné lisovací síly se dřevo měkčí zvýšenou teplotou a vlhkostí neboli plastifikuje. Po ukončení lisovacího procesu se dřevo chladí a suší, tím docílíme zafixování požadovaného tvaru.

## **2.2 Modifikace působením energií**

Modifikace pomocí energií využívá působení elektromagnetického záření. Při použití této úpravy je mikrovlnná energie absorbována vodou a tím dochází k rychlému zvyšování teploty a přeměny vody na páru. Podle použitého typu záření probíhá ohřev buď pouze na povrchu dřeva, nebo v celém jeho průřezu (NIS 2013).

## **2.3 Modifikace kombinací materiálů**

Dřevo má anizotropní charakter a často se v něm vyskytují různé vady. Jedna z cest, jak tyto nevýhody eliminovat, je dřevo rozdělit na menší části a ty poté spojit zpět do jednoho celku. Vrstvení částí dřeva do větších celků usnadňuje výrobu a lze tak dosáhnout větší rozměrové variability. Tato metoda se využívá pro výrobu velkoplošných, tenkých materiálů, které nejsou možné vytvořit jakoukoli jinou metodou z rostlého dřeva.

Jsou dva způsoby, jak vytvořit vrstvené dřevěné materiály. Tyto způsoby se od sebe liší orientací vláken sousedních vrstev. První způsob je překližování. Tento způsob spočívá v křížení směru vláken sousedních vrstev. Příkladem je překližovaná deska (soubor tří a více slepených dých, kde směr vláken sousedních vrstev je na sebe kolmý), křížem lepené dřevo (CLT – Cross Laminated Timber, velkoformátové konstrukční



---

panely, kdy jednotlivé fošny nebo prkna ve tří, pěti nebo sedmi vrstvách jsou na sebe vždy uloženy kolmo). Pokud je směr vláken shodný ve všech směrech, tak se jedná o lamelování. Příkladem takových materiálů je vrstvené dřevo (LVL – Laminated Veneer Lumber, vyráběno slisováním sestaveného souboru dých, kdy vlákna jsou orientována paralelně se směrem výroby) a Intrallam (LSL – Laminated Strand Lumber, výroba podobná LVL s tím rozdílem, že místo dých se používají soubory velkých třísek) (Böhm a kol. 2014)

## **2.4 Chemická modifikace dřeva**

Chemická modifikace dřeva je definována jako jakákoli chemická reakce mezi reaktivní buněčnou složkou dřeva a chemického činidla, s nebo bez katalyzátoru, způsobující zvýšení kovalentních vazeb mezi těmito dvěma komponenty (Navi a Sandberg 2012). Jednodušeji řečeno, je chemická modifikace dřeva založena na působení a reakcích chemických látek se složkami dřeva, přičemž se vytvářejí nové chemické vazby. Pokud je cílem modifikace ovlivnit rozměrové změny dřeva, musí se chemická látka navázat do buněčné stěny a tím znemožnit navázání složek vody. Mechanické vlastnosti je možné ovlivnit změnou chemických vazeb uvnitř dřeva např. impregnací dřeva zpevňujícími látkami nebo acetylací (Xie a kol. 2013).

Chemické modifikace dřeva jsou například acetylace, modifikace čpavkem a modifikace impregnací.

### **2.4.1 Acetylace**

Chemická modifikace acetylací se provádí pomocí acetanhydridů (anhydridů kyseliny octové). Neupravené dřevo obsahuje volné hydroxylové skupiny (-OH), které absorbují nebo uvolňují molekuly vody během změny podmínek prostředí. Princip acetylace spočívá v reakci volných hydroxylových skupin ve dřevě s anhydridem kyseliny octové za vzniku acetylových skupin. Acetylová skupina nahradí atom vodíku v OH skupině, a tím se omezí možnost další reakce s vodou. Díky této reakci je omezena absorpce vody buněčnými stěnami a tím se eliminují následné rozměrové změny (Ibach a kol. 2000).

### **2.4.2 Modifikace čpavkem**

Čpavek se používá v plynné podobě (plyn amoniak), kapalný nebo rozpuštěný ve vodě a než jako modifikátor se spíše využívá pro plastifikaci. Plynný amoniak způsobuje

---

větší hodnoty bodu nasycení vláken ve dřevní hmotě. Při použití čpavkové vody se ve dřevě uvolňují mikrofibrily a tím narůstá vnitřní objem, ale snižují se pružné deformace. Tyto změny způsobené čpavkovou vodou jsou nevratné. Kapalný čpavek dřevo spíše plastifikuje a jím způsobené změny jsou převážně vratné. Čpavek působí na vodíkové můstky mezi makromolekulami, které naruší, ale po jeho odstranění se vodíkové můstky obnovují (Stojčev 1979).

### **2.4.3 Modifikace impregnací**

Impregnace znamená nasycení dřeva cizí látkou do určité hloubky. Látka použitá pro impregnaci nesmí být toxická pro dřevo, uživatele, prostředí a ani při likvidaci impregnovaného materiálu, musí působit hydrofobně a snižovat ve dřevě rovnovážnou vlhkost. Jednotlivé molekuly látky musí být tak velké, aby mohly proniknout buněčnou strukturou a tyto látky by neměly být vyluhovatelné ze dřeva vodou.

Průnik látky do dřeva pomocí impregnace rozdělujeme na povrchový (do 2 mm), mělký (2-10 mm) a hloubkový (nad 10 mm). Aplikace impregnačního nátěru se provádí za normálního tlaku nebo za změněného tlaku (Svatoň 2000).

## **2.5 Hydrotermická modifikace dřeva**

Hydrotermická modifikace dřeva má oproti chemické modifikaci znatelnou výhodu, a to, že výrobky modifikované touto metodou jsou šetrné vůči životnímu prostředí. Během hydrotermického procesu modifikace nejsou přidány žádné chemické látky a žádná chemická degradace nepostihuje modifikované komponenty (Navi a Sandberg 2012).

Jak již název metody napovídá, hlavními činiteli působící při tomto procesu jsou vlhkost a teplo. Díky společnému působení vlhkosti a vyšší teploty se změkčuje lignin ve střední lamelle, bobtnají hemicelulózy a pektiny v buněčné stěně, což má za následek měknutí dřeva a tlaková pevnost dřeva se dočasně sníží až o 40 %. Po ochlazení lignin opět tuhne, ale hemicelulózy a pektiny zůstávají nabobtnalé, kvůli tomu je celková pevnost a tvrdost snížena trvale. Druhy hydrotermické modifikace jsou tepelné zpracování, rekonstituované dřevo, stárnutí dřeva a sušení dřeva (Navi a Sandberg 2012).

---

## **2.6 Termická modifikace dřeva**

Termická modifikace dřeva probíhá za působení vysokých teplot v určitém čase a při této modifikaci dochází k změně fyzikálních, mechanických a chemických vlastností dřeva. V následujících kapitolách se o této modifikaci povíme více.

---

### 3 Termická modifikace dřeva

Termická modifikace dřeva nás provází již z dávných dob, kdy naši předkové opalovali povrchy různých dřevních materiálů, aby tak prodloužili jejich životnost. Opalovali se například kola, konce plotových stojek, záhlaví stropních materiálů a jiných dřevěných výrobků, a tím zvyšovali jejich odolnost proti trouchnivění a rozměrovou stálost (Esteves a kol. 2008; Reinprech a Vidholdová 2008).

Ve dvacátých letech 20. století se objevila první zpráva o účinku úpravy pomocí vyšších teplot na fyzikální vlastnosti. Proces tepelné úpravy proběhl na vysušeném dřevě v prostředí přehřáté páry o teplotě 150 °C po dobu 4 hodin. Výsledkem bylo snížení sorbce vlhkosti o 10 – 15 % (Hill 2006).

V průběhu třicátých let 20. století se tepelná úprava začala zkoumat více, ale náročnost celého procesu znemožňovala bezproblémové technologické zvládnutí. O šedesát let později se tento problém eliminoval díky příchodu moderních technologií. V posledních dekádách se vývoj tepelné úpravy dřeva značně zrychlil. Během osmdesátých let minulého století se francouzský a japonský průmysl začal angažovat v tepelné modifikaci dřeva z důvodu zvýšení odolnosti dřeva proti napadení biotickými činiteli. Od té doby se zájem o dřevo upravené termickou modifikací zvýšil. Díky moderním technologiím se ve Finsku začalo produkovat tepelně modifikované dřevo pod patentovaným názvem ThermoWood® (International Thermowood Association 2003; Reinprecht 2008; Navi a Sandberg 2012; Vondrová 2017).

Jedním z cílů průmyslové termické modifikace dřeva je přeměna domácích, snadno dostupných dřevin na produkt, který se bude vlastnostmi a trvanlivostí podobat dřevinám tropickým, ale hlavním důvodem pro použití termické modifikace je zvyšující se poptávka po dřevě s vysokou trvanlivostí, které je šetrné k životnímu prostředí, a vyšší poptávce po dřevních materiálech se zvýšenou životností bez použití toxických látek (International Thermowood Association 2003; Reinprecht 2008; Navi a Sandberg 2012).

Termická modifikace nebo tepelná úprava dřeva je modifikace, při které prochází materiál chemickými změnami. Proces v podstatě zahrnuje řízenou degradaci dřeva.

Všeobecně se tepelná úprava dřeva zabývá teplotami mezi 150 až 260 °C. Vysoké teploty se dosahují pomocí přehřáté páry v prostředí s nízkým obsahem kyslíku, vakua, nebo v prostředí inertních plynů. Dále se používají místo páry i oleje, které jsou médiem pro přenos tepla a také pomáhají vylučovat kyslík ze dřeva. (Navi a Sandberg 2012).

---

Každá určitá metoda této úpravy má značný vliv na změny vlastností dřevních materiálů a důležitými proměnnými v procesech termické modifikace (Hill 2006) jsou:

1. Atmosféra prostředí v procesu úpravy.
2. Doba termické modifikace.
3. Teplota termické modifikace.
4. Druh dřeviny.
5. Rozměry materiálu.
6. Vlhkost materiálu.

Atmosféra prostředí v procesu úpravy není u každého způsobu modifikace stejná. Úprava může probíhat v atmosféře vzduchu, vakua nebo v prostředí inertních plynů. Proces probíhající v atmosféře vzduchu vede k více oxidačním procesům a výraznějším změnám v chemické degradaci a výsledných vlastnostech materiálu. Při použití oleje pro přenos tepla při termické modifikace je uvolňování kyslíku z dřevního materiálu jednodušší. Při dostatečně vysokém obsahu vlhkosti v prostředí procesu modifikace je výskyt oxidačních procesů výrazně snížen (Hill 2006).

Doba termické modifikace určuje konečné vlastnosti požadovaného materiálu. Určitá doba se odvíjí od rozměrů vstupního materiálu, jeho vlhkosti, teploty termické modifikace a požadovaných vlastností upraveného materiálu.

Teplota termické modifikace udává rozsah změn ve fyzikálních, mechanických a chemických vlastnostech materiálu. Při nižší teplotě úpravy jsou změny pozitivního i negativního charakteru méně výrazné, zato jsou více zachovány vlastnosti původního materiálu, a především mechanické vlastnosti nejsou tolik zhoršeny, občas jsou i zlepšeny, zatímco při použití vyšších teplot úpravy je většinou cílem zvýšení trvanlivosti a hydrofobnosti dřeva za cenu zhoršení mechanických vlastností.

Při určování parametrů termického procesu úpravy se musí dbát na druh dřeviny, jelikož každá dřevina se v prostředí vyšších teplot chová jinak.

Rozměry materiálu ovlivňují dobu termické modifikace, včetně doby ohřevu. Čím má materiál vyšší rozměry, tím by měla být doba ohřevu vyšší, aby se materiál ohřál a upravoval v celém svém průřezu.

Vlhkost dřeva ovlivňuje rychlost přenosu tepla ve dřevě. V mokřém dřevě je vedení tepla výrazně rychlejší než v suchém dřevě.

---

Jak již bylo řečeno, proces termické modifikace je časově náročný, přesahuje i desítky hodin, a jeho délka se určuje v závislosti na druhu dřeviny, počáteční vlhkosti dřeva a teploty termické modifikace. Dřevo, které bylo vystavené vysoké teplotě déle, bývá tmavší a křehčí, ale zároveň je rozměrově stabilnější a odolnější vůči vodě. Působením teplot nad hranici 180 °C dochází ke zdatnému úbytku polysacharidických složek, což má za následek snižování hmotnosti dřeva. Pokud teploty překročí hranici 300 °C, materiál většinou vzplane, dřevo se přemění na hořlavé plyny a zuhelnatěnou vrstvu až v popel, a tudíž dochází ke znehodnocení materiálu. (Hill 2006; Reinprecht a Vidholdová 2008; González-Peña 2009).

V dnešní době se na evropském trhu vyskytuje několik různých výrobců termicky modifikovaného dřeva, z nichž nejznámější jsou:

- Finsko - příprava v prostředí vzduchu a přehřáté páry (ThermoWood®),
- Francie - příprava v prostředí inertních plynů (Rétification a Bois Perdue),
- Holandsko - příprava v prostředí vodní páry (Plato®),
- Německo - příprava v olejích (OHT).

Nové způsoby se v současnosti rozvíjí v Dánsku pod názvem WTT a v Rakousku Huber Holz, oba způsoby využívají při výrobě horkou páru, ale WTT do procesu přidává ještě olej (Militz a kol. 2001; Reinprecht 2008; Navi a Sandberg 2012, Vondrová 2017).

Všechny výše uvedené metody jsou si podobné v modifikování pomocí vyšších teplot. Hlavním rozdílem mezi nimi je druh použitého média pro přenos tepla, a ačkoli je tento rozdíl největší, dále se mezi sebou liší v době procesu modifikace a zvolené teplotě modifikace. Tyto parametry ovlivňují výsledné vlastnosti dřevin po termické modifikaci, a proto je důležité vědět, jak různé kombinace ovlivňují výsledné parametry.



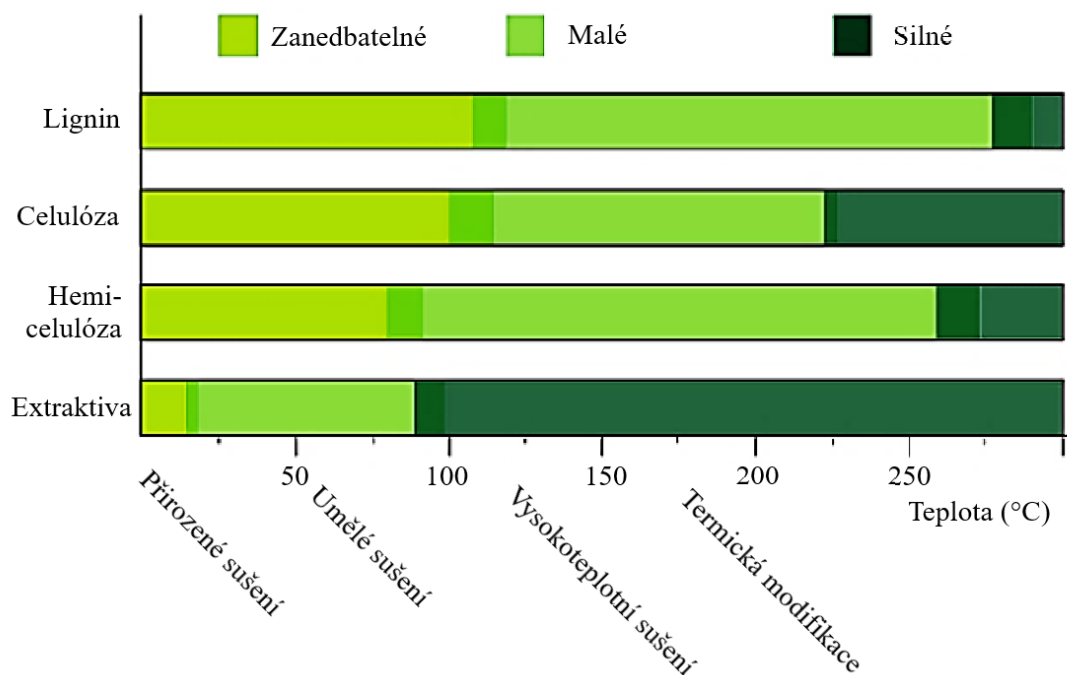
**Obrázek 3 - Ukázka použití termicky modifikovaného dřeva (International Thermowood Association)**

Pokud je požadavkem na cílový produkt to, aby byly zachovány, nebo pouze neznatelně sníženy mechanické vlastnosti za současného zlepšení jiných vlastností, pak se volí teploty nižší v rozmezí 140-180 °C. Na druhou stranu, když je cílem zvýšení trvanlivosti výsledného produktu za cenu zhoršení mechanických vlastností, volí se teploty vyšší v rozmezí 180-260 °C.

### **3.1 Podstata a cíle termické modifikace dřeva**

Podstatou při termické modifikaci dřeva jsou zásahy do chemické struktury dřeva, které se odehrávají v jedné nebo i ve více rovinách. Při těchto zásazích je nutné dbát na to, aby nedošlo k větším změnám v polymerech dřeva, hlavně v polymerizačním stupni celulózy, ten je nezbytný pro pevnost dřeva. Úprava je z chemického hlediska zaměřena na blokaci hydroxylových OH skupin dřeva, a díky této blokaci dochází ke snížení hygroskopicity, a na vznik látek odpuzující biologické škůdce.

Je dokázáno, že významnější změny v chemické struktuře dřeva se uskutečňují až při působení teplot nad 150-170 °C za běžných tlakových, časových a dalších expozičních podmínek. Při působení teplot do 140 °C jsou změny ve dřevě nepatrné. Podstatné změny ve struktuře a vlastnostech dřeva se uskutečňují v intervalu teplot od 180-280 °C. Tepelně upravené dřevo těmito teplotami postupně tmavne a mění vůni, stává se hydrofobnější, zvyšuje se odolnost proti biologickým činitelům a ztrácí svou původní pevnost a tvrdost.



Obrázek 4 - Schématické znázornění změn složek dřeva v důsledku vyšších teplot bez ohledu na čas (Navi a Sandberg 2012)

Hlavními cíli termické modifikace dřeva je připravit takový materiál, který bude:

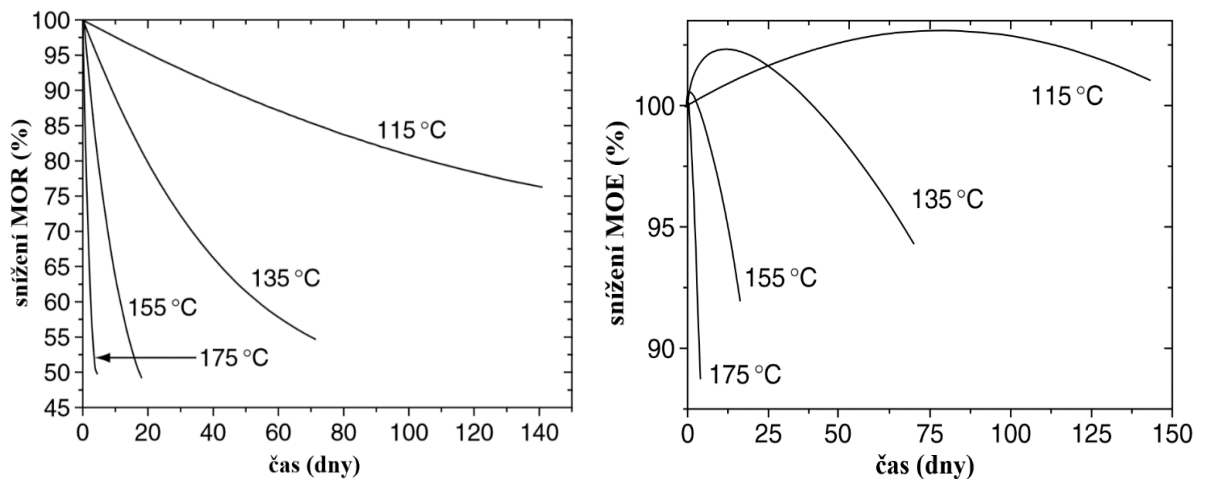
- podstatně více odolný vůči vodě, tzn. snížení nasákavosti,
- více odolný vůči biologickým činitelům,
- mít možnost použití do míst s opakovaným kontaktem s vlhkostí,
- rozměrově a tvarově stabilní, což je dosaženo snížením navlhavosti dřeva
- mít zlepšené tepelně izolační vlastnosti a zároveň sníženou tepelnou vodivost dřeva,
- mít významně prodlouženou životnost,
- vykazovat zachované nebo zlepšené estetické stránky, kterými jsou barva, textura, lesk a minimální podíl trhlin,
- vhodný jako náhrada některých velmi trvanlivých a rozměrově stabilních exotických druhů dřeva,
- použitelný pro výrobu různých dřevařských výrobků do náročných exteriérů a interiérů.



### 3.2 Vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

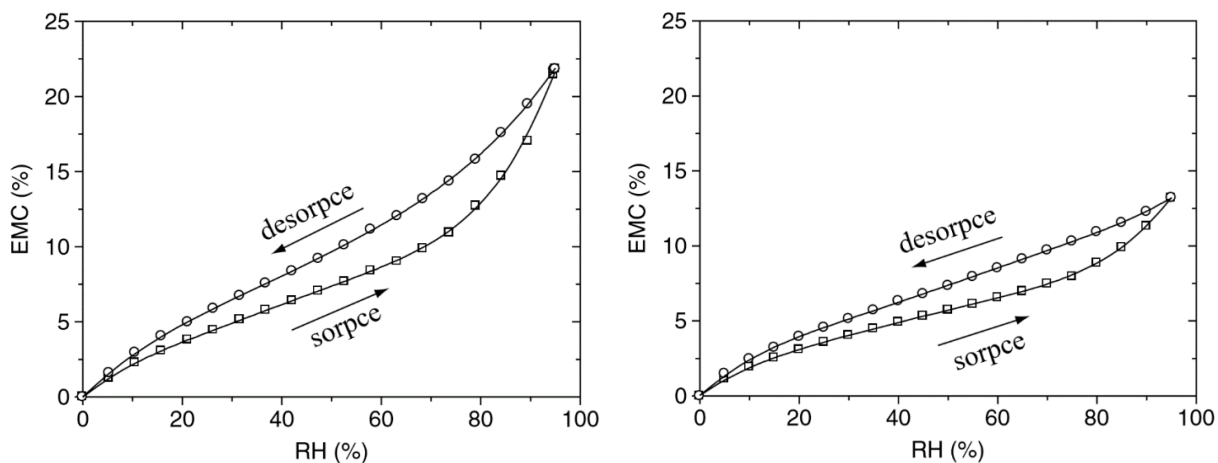
Vlastnosti, které byly vylepšené tímto procesem, má upravená dřevní hmota v celém svém průřezu a ty v něm zůstávají beze změny po celou dobu životnosti výrobku. Důležité je nezapomenout na to, že dřevo, které bylo modifikováno tepelnou úpravou, ztratilo část hmoty z buněčných stěn od čehož se odvíjí mechanické vlastnosti. Dřevo je křehčí, má nižší pevnost v ohybu a tahu, a zvýšenou štípatelnost. Nemělo by se tedy využívat jako konstrukční prvek nosného typu (Reinprecht a Vidholdová 2008; Vondrová 2017).

Termická modifikace působí na modul pevnosti v ohybu negativně, zatímco modul pružnosti je v některých případech i zvýšen. Tyto změny se odvíjí od vstupních parametrů procesu tepelné úpravy. Tyto parametry jsou čas a teplota procesu (Hill 2006; Vondrová 2017).



Obrázek 5 - Změna modulu pevnosti (vlevo) a modulu pružnosti (vpravo) v čase při působení vyšších teplot (Hill 2006)

Již bylo zmíněno, že množství vody ve dřevě upraveném termickou modifikací je redukováno z důvodu blokace hydroxylových funkčních OH skupin dřeva. Výsledkem toho je snížení sesychání a bobtnání, tudíž vyšší rozměrová stálost (Hill 2006, Vondrová 2017).



**Obrázek 6 - Sorpční a desorpční vlastnosti nemodifikovaného dřeva (vlevo) a modifikovaného (vpravo) v atmosféře dusíku při 250 (°C) po dobu dvou hodin (Hill 2006)**

I přes znatelné snížení sesychání a bobtnání dřeva upraveného termickou modifikací je jeho využití v prostředí v kontaktu se zemí nedoporučované, jelikož stupeň ochrany není dostatečný, avšak podle studií je možné využití ve třídách 1-3. stupně (Hill 2006; Vondrová 2017).

### 3.3 Způsoby termické modifikace

Způsobů termické modifikace dřeva je na dnešním trhu více a mezi sebou se liší v podmínkách procesu (tlak, teplota, čas, sušící medium atd.). V současné době na evropském trhu jsou nejoblíbenější následující modifikační metody.

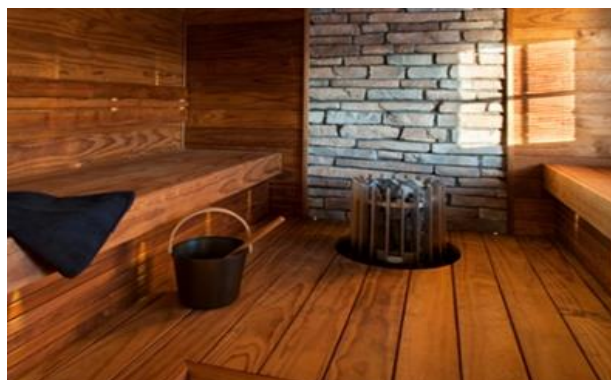
Tabulka 1 - Způsoby termické modifikace

Způsob termické modifikace	Země původu	Sušící médium / prostředí
<b>ThermoWood®</b>	Finsko	Přehřátá pára a nízký obsah kyslíku (3-5%)
<b>Rétification</b>	Francie	Inertní atmosféra dusíku s podílem kyslíku do 2%
<b>Plato®Wood</b>	Nizozemsko	Nasycená pára se zvýšeným tlakem v prostředí (0,6-0,9 Mpa)
<b>OHT (Oil Heat Treatment)</b>	Německo	Horký rostlinný olej

#### 3.3.1 ThermoWood®

ThermoWood® je proces, který byl vyvinut finskou společností VTT (Technical Research center of Finland), a je nejpoužívanějším procesem termické modifikace dřeva. Dle patentu je stanoveno, že je dřevo ohříváno ve vlhkém prostředí nad teplotu 150 °C po dobu 2-10 hodin, aby dosáhlo minimální ztráty hmotnosti 3 %. Hlavní výhodou této modifikace je absence jakýchkoli chemických látek a celý tento proces probíhá jen pomocí páry s obsahem kyslíku 3-5 %, bez použití zvýšeného tlaku a s prouděním vzduchu, přičemž uložení dřeva musí být v komoře rovnoměrné na sebe a oddělené pomocí příček.

Tento typ modifikace byl použit pro tuto práci a později bude popsána více.



Obrázek 7 - Ukázka využití ThermoWood® (Thermowood.fi)

---

### 3.3.2 Rétification

Tato technologie termické modifikace dřeva je používána společností NOW S. A. (New Option Wood) ve Francii.

Dřevo musí být nejdříve předsušeno na 12% vlhkost. Retifikační proces je založen na postupném ohřevu dřeva v inertním prostředí dusíku až na teplotu 210 – 260 °C, kde podíl kyslíku je do 2 %. Díky tomu je dřevo částečně pyrolyzováno bez výraznějších termo-oxidačních reakcí, což vede k menšímu poklesu pevnostních vlastností. Celý tento proces trvá cca 7 – 14 hodin (Gašparík 2018).

Dřeviny použité pro tuto metodu jsou borovice, jedle a smrk, případně topol. „Retiwood“ se vyznačuje sníženou hygroskopicitou, zvýšenou odolností vůči hnilobě a vyšší rozměrovou stabilitou. Ohybová pevnost dřeva je snížena přibližně o 40 %, rovnovážná vlhkost dřeva dosahuje průměrně 4 – 5 %. Takto modifikované dřevo není doporučeno na natírání z důvodu snížení adheze nátěrových látek, jež je zapříčiněno vylučováním pryskyřice (Vernois 2019).

### 3.3.3 Plato<sup>®</sup>Wood

Tento proces termické modifikace je využíván společností Platowood B.V. v Nizozemsku.

Plato<sup>®</sup> proces se skládá ze 4 fází:

1. **Hydrotermická úprava** – dřevo je uloženo ve speciálním autoklávu, kde je ohříváno nasycenou párou při tlaku 0.6-0,9 MPa až na konečnou teplotu 150-180 °C po určitý čas v závislosti na druhu dřeviny, rozměrech dřeva a celkovém objemu.
2. **Sušení** - dřevo je umístěno do sušící komory a je pomalu ohříváno a sušené na vlhkost 8-10 % po dobu 5-21 dní.
3. **Vytvrzování** – dřevo je přesunuté do velkokapacitních komor, kde se ohřívá při teplotě 150 – 190 °C a atmosférickém tlaku. Vlhkost dřeva dosáhne hodnotu cca 1 %. Obsah kyslíku v komoře je udržován na 2 % pomocí vstříkovaní přehřáté páry, což zabraňuje vznícení dřeva. Celý tento proces trvá 12 – 160 hodin.
4. **Klimatizování** – V průběhu 3 dnů je pomalým vlhčením upravená vlhkost dřeva na 3 – 5 % (PlatoWood 2019).

---

Pro výrobu Plato<sup>®</sup>Wood se nejčastěji používá fraké a smrk. Výsledný produkt má tmavohnědou barvu, která postupně bledne a mění se na šedou při vystavení povětrnostním podmínkám. Rovnovážná vlhkost je snížena o 30 – 40 %, modul pružnosti dosahuje maximálně 10 % vyšších hodnot jako při nemodifikovaném dřevě a mez pevnosti je nižší o cca 5 – 20 % (Gašparík 2018; PlatoWood 2019).



**Obrázek 8 - (Zleva) Dřevo smrku neupravené, upravené Plato<sup>®</sup> procesem, časem zešednutí povrchu upraveného dřeva (PlatoWood.com)**

### **3.3.4 OHT**

OHT proces (Oil Heat Treatment) je proces termické modifikace, který probíhá v impregnační nádobě, ve které je uloženo dřevo a následně je ohříváno na teplotu 180 – 210 °C pomocí horkého rostlinného oleje, který slouží jako médium pro přenos tepla a zároveň zabraňuje přístupu kyslíku, který spouští nežádoucí termooxidační reakce. Teplotu kolem 200 °C je nutné ve dřevě udržet po dobu 2 – 4 hodin. V současnosti se používá lněný, slunečnicový a řepkový olej (Gašparík 2018).

Nejčastěji se pro tento proces OHT používá smrk a borovice. Výsledný produkt má tmavohnědou barvu bez barevných odlišností na ploše, které jsou typické pro dřevo modifikované v prostředí vzduchu. Dřevo upravené touto metodou má výraznější zápach modifikovaného dřeva, který je způsoben obsahem oleje. Modul pružnosti dosahuje 10-15 % vyšší hodnoty jako při nemodifikovaném dřevě, bobtnání a sesychání je sníženo vlivem modifikace olejem při teplotě 220 °C o přibližně 40 %. Mez pevnosti je snížena průměrně o 30 % a hodnota rázové houževnatosti je snížena až o 50-60 % v porovnání s nemodifikovaným dřevem (Qijuk Research Centre 2013).

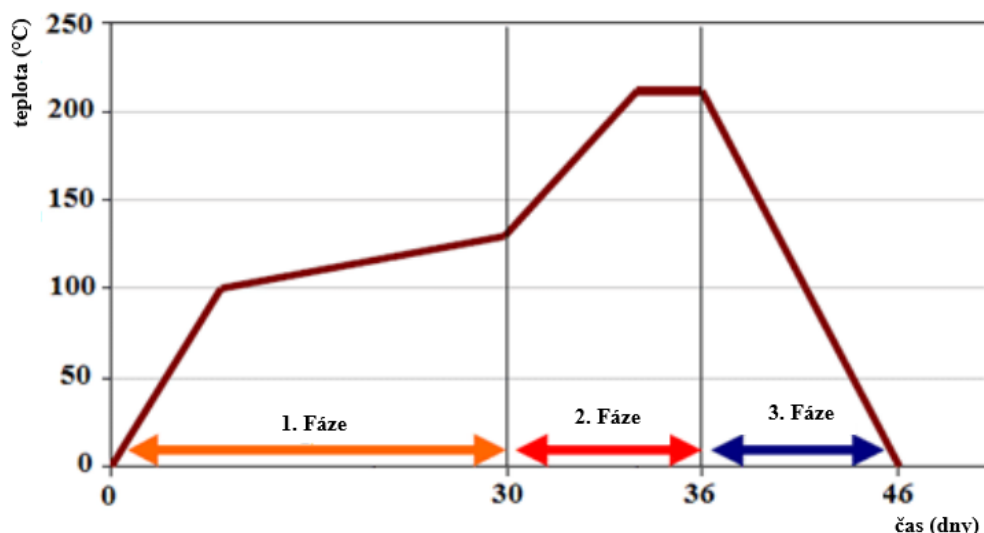


Obrázek 9 - (Zleva) Impregnační nádoby procesu OHT a ukázka použití OHT dřeva (Qijuk.com)

### 3.4 Termická modifikace v atmosféře vzduchu

Jak již bylo uvedeno v dřívějších zdrojích, např. Reinhold a Vidholdová (2008), nebo Barčík a Gašparík (2017), proces termické modifikace v atmosféře vzduchu se skládá ze 3 fází:

- **1 fáze: Fáze ohřevu a sušení** – V komoře se prudce zvýší teplota na 100°C, a poté je teplota v komoře postupně zvyšována na 130 °C. Sušícím médiem v této fázi je horký vzduch nebo horká pára, během této fáze se snižuje vlhkost dřeva až na nulu. Doba fáze sušení je závislá na počáteční vlhkosti dřeva, dřevině, a hlavně tloušťce řeziva.
- **2 fáze: Fáze termické modifikace** – V této fázi se teplota v komoře postupně zvyšuje na požadovanou teplotu termické modifikace, podle grafu na obr. ... konkrétně na 210°C. Při dosažení požadované teploty modifikace je tato teplota udržována 2 – 3 hodiny. V této fázi je do komory vháněna pára, která má funkci ochranného média. Zabraňuje vznícení a podporuje probíhající chemické reakce.
- **3 fáze: Fáze ochlazování** – Dřevo po termické modifikaci má vysokou teplotu a při jeho kontaktu s venkovním vzduchem by mohlo dojít ke znehodnocení, proto je důležité dřevo postupně v komoře ochlazovat a vlhčit párou, abychom zabránili vzniku trhlin. Komora se otvírá při teplotě 40 °C a méně.



Obrázek 10 - Fáze termické modifikace (Gašparík a kol. 2014)

Produkty ThermoWood se rozdělují na dvě třídy použití. **Thermo-S** a **Thermo-D**. Mezi sebou se liší podle teploty termické modifikace.

Tabulka 2 - Třídy ThermoWood a jejich teploty modifikace (International Thermowood Association 2003)

Třída	Jehličnaté dřevo	Listnaté dřevo
Thermo-S	190 ± 3 °C	185 ± 3 °C
Thermo-D	212 ± 3°C	200 ± 3 °C

Tabulka 3 - Změna vlastností tříd ThermoWood (International Thermowood Association 2003)

Vlastnosti	Jehličnaté dřeviny		Listnaté dřeviny	
	Thermo-S	Thermo-D	Thermo-S	Thermo-D
Odolnost vůči povětrnostním vlivům	+	++	bez změny	+
Rozměrová stabilita	+	++	+	+
Ohybová pevnost	bez změny	-	bez změny	-
Barevná tmavost	+	++	+	++

+ zlepšení, ++ výrazné zlepšení, - zhoršení

---

**Thermo-S** je materiál s vylepšenou rozměrovou stabilitou. Proces jeho výroby má mnohem mírnější podmínky termické úpravy. Jeho použití je hlavně v interiérových prostorech se suchým prostředím, nebo v krytých prostorech s příležitostně zvýšenou vlhkostí. Využívá se například na podlahy, nábytek, sauny, okna a dveře.

**Thermo-D** je materiál se zvýšenou trvanlivostí (D=durability). Proces výroby má vyšší teploty termické modifikace. Použití má jako Thermo-S, ale dá se navíc použít v exteriéru s vlhkostí nad 20 % (ThermoWood Handbook 2003).



---

## 4 Charakteristika vybraných dřevin

Dřevo nás provází již od nepaměti. Díky jeho obnovitelnosti a vlastnostem se jeho použití stále zvyšuje. Každý druh se ale svými vlastnostmi liší od ostatních. Je to dáno tím, že dřevo je organického původu a vzniká přírodními procesy. Úroveň zkoumání dřeva se rozlišuje na makroskopickou a mikroskopickou strukturu (Gandelová a kol. 2009).

Přírodní procesy se ale liší podle lokace růstu dřeva a tím se také liší konečná dřevní hmota. Primárním cílem průmyslové termické modifikace je přeměna domácích snadno dostupných dřevin na produkt, který se bude podobat vlastnostmi a trvanlivostí dřevinám tropickým (International Thermowood Association, 2003; Reinprecht a kol. 2008).

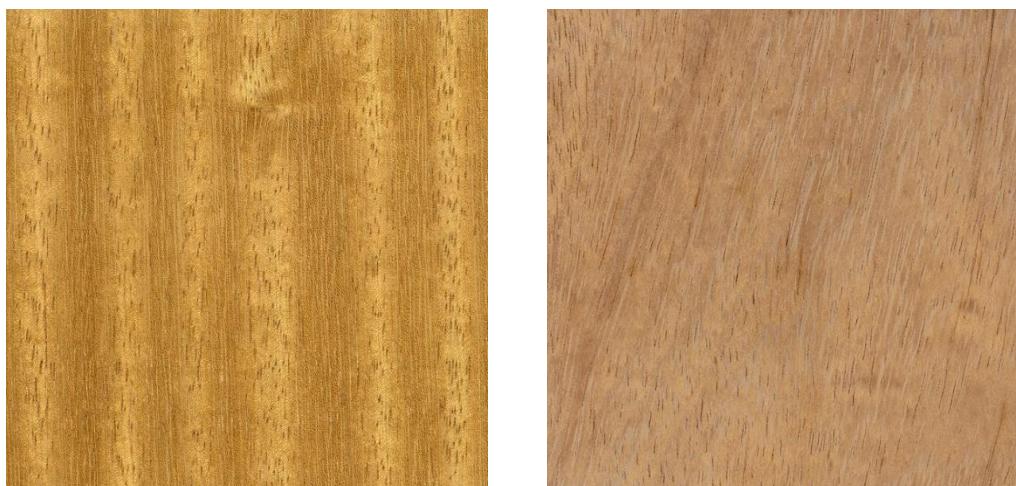
Pro tuto práci a experiment byly ale vybrány dřeviny tropické. Těmito dřevinami jsou iroko (*Milicia excelsa*, *Milicia regia*) a padouk (*Pterocarpus soyauxii*).

### 4.1 Iroko

Iroko je tropické dřevo původem ze západní a střední Afriky. V použití tato dřevina již delší dobu soutěží s teakem, proto se mu občas přezdívá africký teak, a stejně tak může nahradit dub. Díky obsahu jeho olejnatých pryskyřic je velmi odolné vůči vodě, plísním, hnilobě a hmyzu a díky tomu je jeho použití v interiérech a exteriérech více než vhodné (ARA – továrna na nábytek a.s. 2019).

#### 4.1.1 Popis dřeva iroko

Průměr kmene se pohybuje mezi 80–100 cm, bělové dřevo je 5-10 cm tlusté, barvu má běložlutou a od jádrového dřeva je dobře odlišná a je nepoužitelné. Barva jádrového dřeva je obvykle žlutá až zlatá nebo středně hnědá. Jeho struktura je stejnorodá, ale hrubá, cévy jsou široké a viditelné. Jeho hustota se při 12% vlhkosti pohybuje okolo 650 kg/m<sup>3</sup> (Cirad 2012; ARA – továrna na nábytek a.s. 2019; The Wood Database 2019).



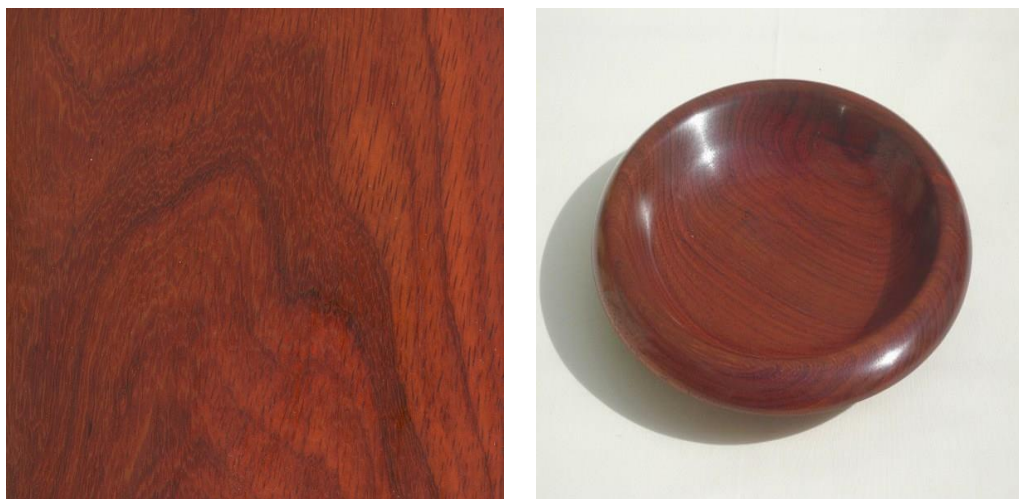
Obrázek 11 - Ukázka dřeviny iroko (Wood-database.com)

## 4.2 Padouk

Padouk je tropické dřevo původem ze západní Afriky, Nigerie, Gabonu a Angoly. Jeho použití je díky jeho struktuře, barvě a vůni rozšířené hlavně pro masivní nábytek, dýhovaný nábytek, podlahové parkety, pohledové konstrukční prvky a dekorativní interiérové prvky. Dále se ale také používá jako mostní a lodní konstrukce. Trvanlivost dřeva padouku je vysoká, je odolné proti termitům, houbám a dřevokaznému hmyzu (ARA - továrna na nábytek a.s.).

### 4.2.1 Popis dřeva padouk

Běl je cca 8 cm široká a bělové dřevo je světlehnědé až žluté a od jádrového dřeva je snadno rozlišitelné. Jádrové dřevo má oranžovou barvu a je často tmavě žilkované. Po opracování povrch rychle tmavne do červeno hněda. Jeho struktura je stejnorodá, ale hrubá, žilky a cévy jsou široké a viditelné. Jeho hustota se při 12% vlhkosti pohybuje okolo 740 kg/m<sup>3</sup> (Cirad 2012; ARA – továrna na nábytek a.s. 2019; The Wood Database 2019).



Obrázek 12 - Ukázka dřeviny padouk a výrobku z něj (Wood-database.com)

### 4.3 Vlastnosti dřevin iroko a padouk

Následující tabulka popisuje některé vlastnosti dřevin iroko a padouk.

Tabulka 4 - Vlastnosti a trvanlivosti dřevin iroko a padouk (Cirad 2012)

	iroko		padouk	
Vlastnosti	Střední hodnota	Standartní odchylka	Střední hodnota	Standartní odchylka
<b>Koeficient objemového sesychání</b>	0,44 %	0,07 %	0,44 %	0,10 %
<b>Celkové tangenciální sesychání (TS)</b>	5,40 %	0,70 %	5,00 %	0,50 %
<b>Celkové radiální sesychání (RS)</b>	3,50 %	0,40 %	3,20 %	0,30 %
<b>Poměr TS/RS</b>	1,5		1,6	
<b>Pevnost v tlaku*</b>	54 MPa	6 MPa	65 MPa	8 MPa
<b>Statická pevnost v ohybu*</b>	87 MPa	15 MPa	116 MPa	24 MPa
<b>Modul pružnosti*</b>	12840 MPa	2496 MPa	15870 MPa	1885 MPa
* = při 12% obsahu vlhkosti; MPa = 1 N/mm <sup>2</sup>				
Odolnost a trvanlivost	iroko		padouk	
<b>Odolnost proti houbám</b>	Třída 1-2 : Velmi odolné - odolné		Třída 1 : Velmi odolné	
<b>Odolnost proti termitům</b>	Třída D : odolné		Třída D : odolné	
<b>Přirozená trvanlivost</b>	Třída 3 : Exterier, ne v kontaktu se zemí		Třída 4 : Exterier, i kontakt se zemí a vodou	

---

## **Praktická část**

### **5 Metodika**

Na základě cíle této diplomové práce je možné rozdělit metodiku na následující body:

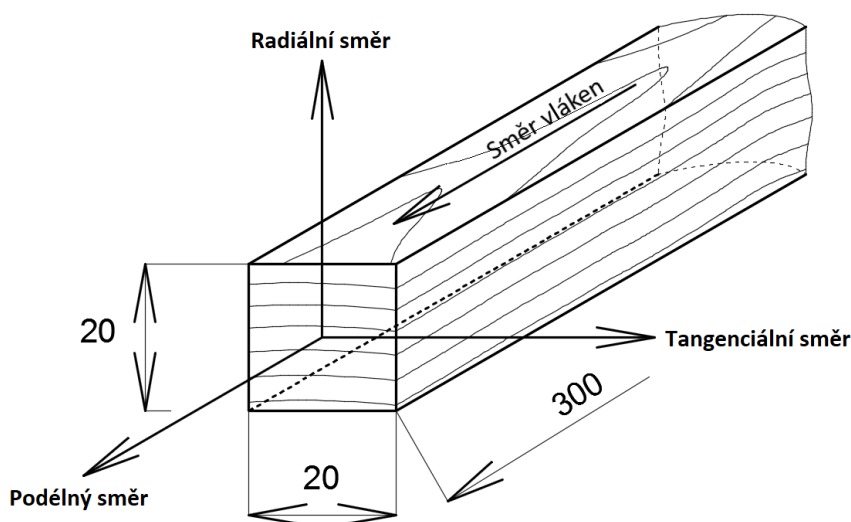
1. Příprava a značení zkušebních těles.
2. Termická modifikace zkušebních těles.
3. Experimentální měření.
4. Výpočet zkoumaných charakteristik.
5. Vyhodnocení naměřených výsledků.

---

## 6 Metodika experimentální práce

### 6.1 Příprava a značení zkušebních těles

Od každé dřeviny jsme připravili 4 soubory zkušebních těles kvůli zvoleným teplotám termické modifikace ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $T=160^{\circ}\text{C}$ ;  $T=180^{\circ}\text{C}$ ;  $T=210^{\circ}\text{C}$ ). Každý soubor zkušebních těles obsahoval 20 zkušebních vzorků o rozměrech 20 mm tloušťky, 20 mm šířky, 300 mm délky. Vzorky byly připraveny v dílnách České zemědělské univerzity v Praze na Fakultě lesnické a dřevařské.



Obrázek 13 - Tvar a rozměry zkušebních těles

Jelikož fošny dřevin, ze kterých byly zkušební vzorky vyrobeny, měly tloušťku 40 - 50 mm, tak se kód pro značení vzorků rozděloval následovně:

S / IR / 1 / 1 / 1 / 20° (příklad)

- S/H = určili jsme si horní a spodní část fošny, tedy S je spodní a H je horní,
- IR/PD = zkratka IR je pro dřevinu iroko a zkratka PD je pro dřevinu padouk,
- První číslo v kódu je číslo fošny,
- Druhé číslo v kódu je číslo prkna, které jsme získali z fošny,
- Třetí číslo je samostatné číslo vzorku,
- Poslední číslo je pro zvolený stupeň modifikace.

---

Vzorky byly připraveny na formátovací pile a pro dosažení konečné tloušťky 20 mm oboustranně frézovány.



Obrázek 14 - Zkušební vzorky iroko před termickou modifikací (Foto: Autor)



Obrázek 14 - Zkušební vzorky padouku před termickou modifikací (Foto: Autor)

---

## 6.2 Termická modifikace zkušebních těles

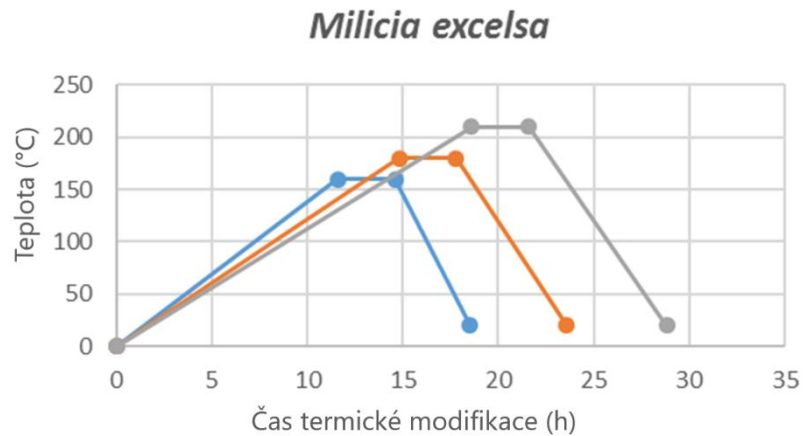
Termická modifikace vzorků byla provedena ve vysokoteplotní komoře od firmy Katres v areálu České zemědělské univerzity, který je umístěn ve městě Kostelec nad Černými lesy.



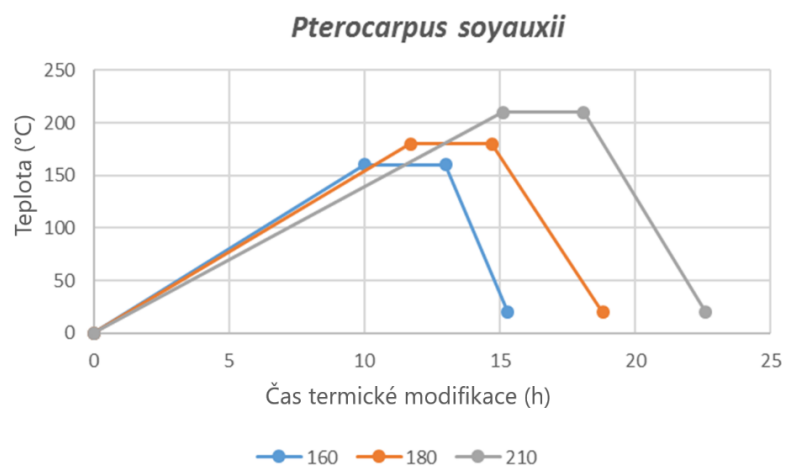
Obrázek 15 - Rozložení vzorků iroko v termovací komoře (Foto: Autor)

Termická modifikace vzorků byla rozdělena do tří fází:

1. Ohřev a sušení: V této fázi se teplota v komoře prudce zvedla na 100 °C díky páře. Sušicím médiem je horký vzduch. Dřevo je v tomto kroku vysušeno přibližně na nulový obsah vlhkosti.
2. Termická modifikace: V druhé fázi je teplota v komoře postupně zvyšována na požadovanou teplotu termické modifikace ( $T=160\text{ °C}$ ;  $T=180\text{ °C}$ ;  $T=210\text{ °C}$ ) a při dosažení této teploty je udržována po dobu 3 hodin.
3. Chlazení a klimatizace: V poslední fázi se dřevo postupně ochlazuje na teplotu 60 °C a vlhkost je nastavena tak, aby se konečný obsah vlhkosti ve dřevě stabilizoval mezi 4 – 7 %.



**Graf 1 - Průběh termické modifikace dřeviny iroko**



**Graf 2 - Průběh termické modifikace dřeviny padouk**

**Tabulka 5 - Vstupní technologické parametry**

Vstupní technologické parametry		
<b>Dřevo</b>	Vlhkost dřeva	2 až 4 %
<b>Termovací komora</b>	Kapacita pece	0.8 m <sup>3</sup>
	Ohřev	Až do 260 °C
	Chlazení	Až do 20 °C
	Maximální získaná teplota	210 °C

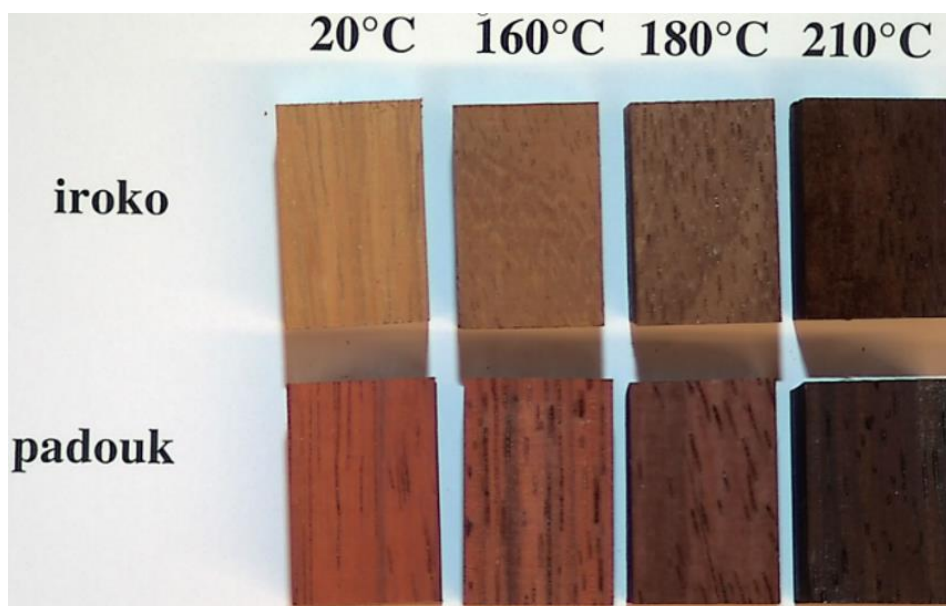


**Tabulka 6 - Časy modifikace jednotlivých teplot u dřeviny iroko**

Iroko IR						
Ohřev	11,6 h	20-160	14,8 h	20-180	18,6 h	20-210
Termování	3 h	160	3 h	180	3 h	210
Chlazení	3,92 h	160-60	5,76 h	180-60	7,2 h	210-60
<b>Celkový čas modifikace</b>	<b>18,52 h</b>		<b>23,56 h</b>		<b>28,8 h</b>	

**Tabulka 7 - Časy modifikace jednotlivých teplot u dřeviny padouk**

Padouk PD						
Ohřev	10 h	20-160	11,7 h	20-180	15,1 h	20-210
Termování	3 h	160	3 h	180	3 h	210
Chlazení	2,3 h	160-60	4,1 h	180-60	4,5 h	210-60
<b>Celkový čas modifikace</b>	<b>15,3 h</b>		<b>18,8 h</b>		<b>22,6 h</b>	



**Obrázek 16 - Ukázka barevných změn u všech teplot modifikace vybraných dřevin (Foto: Autor)**

Hodnoty hmotnosti a rozměrů vzorků byly naměřeny před a po termické modifikaci.

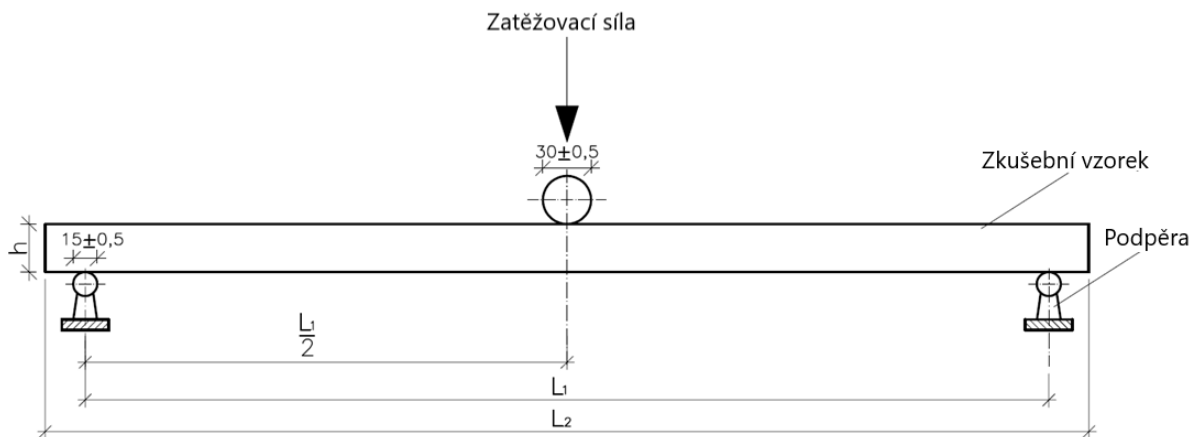
### 6.3 Experimentální měření

Z každého souboru zkušebních těles byl odebrán určitý počet vzorků, které byly mrazeny v teplotě  $-10\text{ °C}$  a  $-20\text{ °C}$ .

Pro měření tří bodového ohybu byla vzdálenost podpěr nastavena na  $L_1 = 20 \times h$ . Zkušební tělesa byly ohýbány v polovině jejich délky (Obr. 18) za použití univerzálního testovacího zařízení FPZ 100 (TIRA, Německo) v souladu s normou EN 310 (1993).

Rychlost zatěžování těles byla nastavena na  $3\text{ mm/min}$ , aby doba celého testu nepřesáhla 2 minuty.

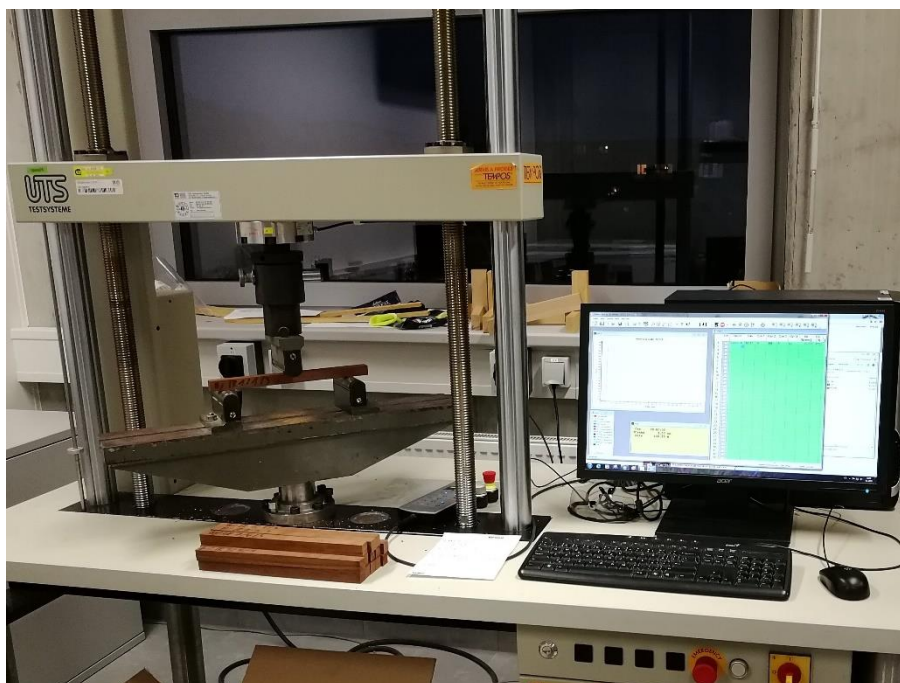
Maximální síly pro deformace vzorků byly zaznamenávány pomocí záznamníku dat ALMEMO 2690-9 (Ahlborn GmbH, Německo).



Obrázek 17 - Princip zkoušky tří-bodového ohybu (EN 310)

Všechna potřebná data byla získána z naměřených napětově-deformačních diagramů. Pro identifikaci charakteristik byl použit program, který byl vyvinut Katedrou Zpracování Dřeva a Biomateriálů, s cílem přesně identifikovat a kvantifikovat data, která lze získat z diagramu síly deformace.

Hustota dřeva byla stanovena před a po testování v souladu s ISO 13061-2 (2014). Obsah vlhkosti ve zkušebních vzorcích byl stanoven před a po testování v souladu s ISO 13061-1 (2014). Sušení bylo rovněž provedeno v souladu s ISO 13061-1 (2014).



Obrázek 18 - Testovací zařízení FPZ 100 pro tří-bodový ohyb a samotná zkouška (Foto: Autor)

## 6.4 Výpočet zkoumaných charakteristik

Data, která jsme naměřili, byla použita k vytvoření silově-deformačního diagramu, ve kterém jsme použili metodu přesné identifikace námi vytvořených hraničních bodů:

1. Síla na mezi úměrnosti „ $F_E$ “
2. Průhyb na mezi úměrnosti „ $Y_E$ “
3. Síla na mezi pevnosti v ohybu „ $F_P$ “
4. Průhyb na mezi pevnosti v ohybu „ $Y_P$ “

V následující části této práce jsme se zaměřili na vyhodnocení ohybatelnosti za použití minimálního poloměru ohybu a koeficientu ohýbatelnosti. Pro analýzu jsme použili vzorce (1,2,3 a 4), které jsme vyvodili z publikace „Koeficient ohybu dřeva jako funkce vybraných faktorů“ (Gaff a kol. 2016).

---

Vzorce pro minimální poloměr ohybu „ $R_{minB}$ “ (1) a koeficient ohybu „ $K_{ohB}$ “ (2) jsou založeny na geometrii ohybu.

$$R_{minB} = \frac{l_0^2}{8 * y_{max}} + \frac{y_{max}}{2} - \frac{h}{2} \quad (1)$$

$$K_{ohB} = \frac{h}{R_{minB}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{8 * y_{max}} + \frac{y_{max}}{2} + \frac{h}{2}} \quad (2)$$

Vzorce pro minimální poloměr ohybu „ $R_{minC}$ “ (3) a koeficient ohybu „ $K_{ohC}$ “ (4) jsou založeny na základní rovnici ohybu.

$$R_{minC} = \frac{l_0^2}{12 * y_{max}} \quad (3)$$

$$K_{ohC} = \frac{h}{R_{minC}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{12 * y_{max}}} \quad (4)$$

Účinek jednotlivých faktorů byl vyhodnocen pomocí ANOVA, konkrétně s využitím Fisherova F-testu v STATISTICA 12 (Statsoft Inc., USA). Výsledky byly vyhodnoceny pomocí 95% intervalu spolehlivosti, který představuje úroveň významnosti 0,05 ( $P < 0,05$ ). Pokud je hodnota hladiny významnosti v tabulce nižší než 0,05, tak je daný faktor nebo vlastnost statisticky významný a je červenou barvou, protože statistická chyba je menší, než je přípustná hodnota. Když je hodnota vyšší než 0,05 není faktor statisticky významný a je černou barvou.

Pro určení vlivu hustoty dřeva na sledované charakteristiky jsme použili korelační analýzu a koeficient determinace „ $r^2$ “, který lze použít k popisu závislosti mezi sledovanými charakteristikami.

## 7 Výsledky experimentu

Průměrné hodnoty sledovaných charakteristik, průměrná hustota a odpovídající variační koeficient jsou znázorněny v následujících tabulkách a grafech.

### 7.1 Iroko

Průměrné hodnoty  $Y_E$ ,  $Y_P$ ,  $F_E$ ,  $F_P$  a hustoty pro dřevinu iroko jsou znázorněny v následující tabulce (hodnoty v závorkách jsou variačními koeficienty v %):

Tabulka 8 - Střední hodnoty  $Y_E$ ,  $Y_P$ ,  $F_E$ ,  $F_P$  a hustoty pro dřevinu iroko

<i>Milicia excelsa</i>							
Teplota modifikace (°C)	Chlazení vzorků	$Y_E$ (mm)	$Y_P$ (mm)	$F_E$ (N)	$F_P$ (N)	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	N
	(°C)						
20	0	2,0 (11,5)	5,0 (20,6)	996 (19,3)	2079 (23,0)	615 (13,7)	30
20	-10	2,4 (13,6)	5,9 (17,6)	1231 (18,0)	2488 (14,6)	633 (10,9)	30
20	-20	2,3 (14,9)	5,7 (12,5)	1177 (19,2)	2480 (14,4)	628 (9,0)	30
160	0	3,1 (20,9)	4,7 (18,5)	1542 (16,7)	2180 (20,7)	593 (11,1)	30
160	-10	3,6 (20,6)	5,6 (20,4)	1624 (17,6)	2264 (21,6)	604 (10,9)	30
160	-20	3,7 (20,6)	5,2 (19,4)	1542 (16,1)	2018 (19,6)	589 (11,6)	30
180	0	3,0 (18,4)	4,5 (14,2)	1518 (16,2)	2015 (20,0)	591 (11,7)	30
180	-10	3,8 (20,0)	4,9 (19,6)	1517 (19,5)	1987(20,2)	579 (10,9)	30
180	-20	3,7 (20,5)	4,9 (15,9)	1653 (21,9)	2159 (23,8)	579 (11,5)	30
210	0	2,7 (15,8)	3,3 (20,2)	1181 (18,1)	1397 (16,7)	594 (12,5)	30
210	-10	3,2 (20,4)	3,6 (18,2)	1343 (17,1)	1397 (19,7)	580 (10,0)	30
210	-20	3,7 (20,5)	4,9 (15,9)	1660 (15,3)	2016 (15,9)	583 (13,0)	30

Dle naměřených hodnot je zřejmé, že měřené charakteristiky na mezi úměrnosti  $Y_E$  a  $F_E$  se při tepelné modifikaci zvyšují. Měřené charakteristiky  $Y_P$  se při tepelné modifikaci snižují, ale  $F_P$  se při teplotě 160 °C zvýšila, a poté nastal pokles hodnot. Hustota se při procesu termické modifikace snížila.

Tabulka 9 - Procentuální vyjádření změn naměřených charakteristik

<i>Milicia excelsa</i>															
	$Y_E$ (mm)			$Y_P$ (mm)			$F_E$ (N)			$F_P$ (N)			Hustota (kg/m <sup>3</sup> )		
	0	-10	-20	0	-10	-20	0	-10	-20	0	-10	-20	0	-10	-20
20		20%	15%		18%	14%		23%	18%		19%	19%		3%	2%
160	55%	50%	60%	-6%	-5%	-9%	55%	32%	31%	5%	-9%	-19%	-4%	-5%	-6%
180	50%	58%	60%	-10%	-17%	-14%	52%	23%	40%	-3%	-20%	-13%	-4%	-9%	-8%
210	35%	33%	60%	-40%	-39%	-14%	19%	9%	41%	-33%	-44%	-19%	-4%	-9%	-8%

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $Y_E$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $Y_E$  dřeviny iroko.

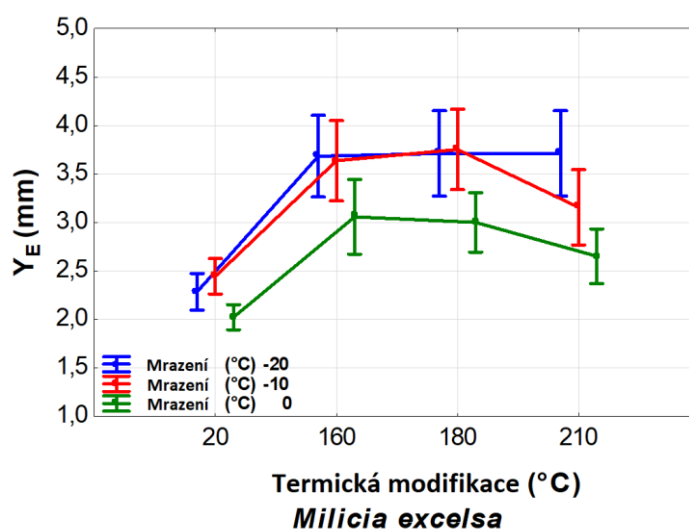
Tabulka 10 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $Y_E$  dřeviny iroko

$Y_E$ (mm) <i>Milicia excelsa</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Úroveň významnosti P
Intercept	1613,015	1	1613,015	4340,835	V
1) TM	44,732	3	14,911	40,127	V
2) M	14,077	2	7,038	18,941	V
3) TM * M	3,191	6	0,532	1,431	NV
Chyba	58,711	158	0,372		

Průslušný model vysvětluje zhruba 41,3 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 3 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází k nárůstu hodnot sledované charakteristiky  $Y_E$ . Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se neprojevil statisticky významný rozdíl v naměřených hodnotách. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily.



Graf 3 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $Y_E$  dřeviny iroko

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $Y_P$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $Y_P$  dřeviny iroko.

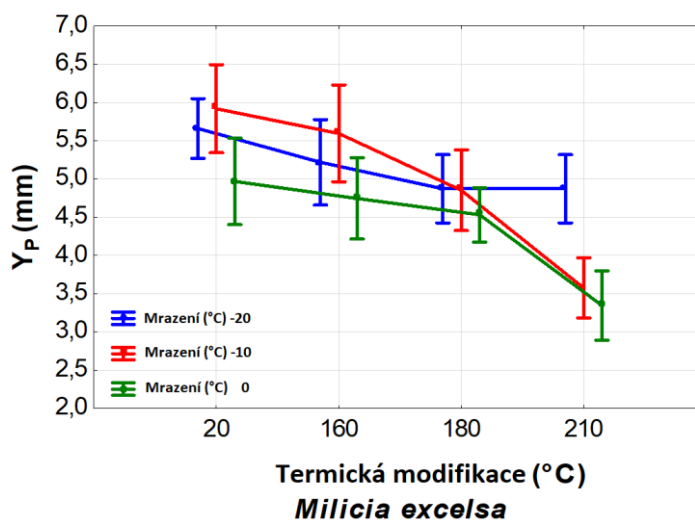
Tabulka 11 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $Y_P$  dřeviny iroko

$Y_P$ (mm) <i>Milicia excelsa</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	3957,712	1	3957,712	5113,486	V
1) TM	56,892	3	18,964	24,502	V
2) M	17,328	2	8,664	11,194	V
3) TM * M	14,099	6	2,35	3,036	V
Chyba	122,288	158	0,774		

Průslušný model vysvětluje zhruba 63,5 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 4 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází k poklesu hodnot sledované charakteristiky  $Y_P$ . Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil statisticky významný rozdíl v naměřených hodnotách tepelné modifikace 210 °C. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily.



Graf 4 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $Y_P$  dřeviny iroko

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $F_E$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $F_E$  dřeviny iroko.

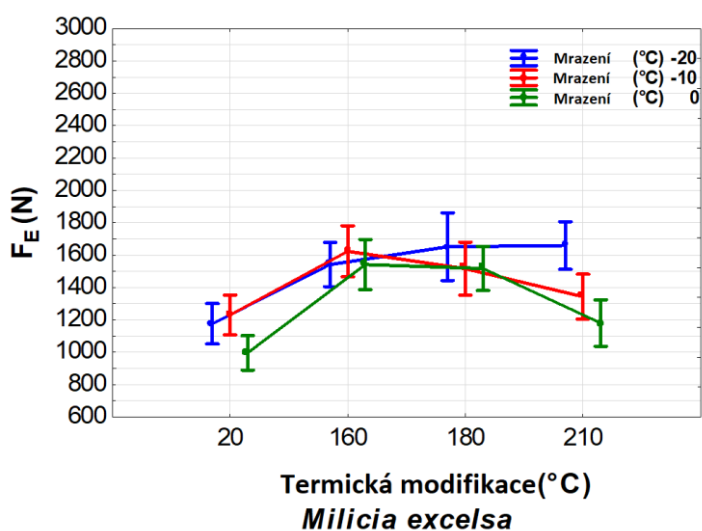
Tabulka 12 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $F_E$  dřeviny iroko

$F_E$ (mm) <i>Milicia excelsa</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	337596176	1	337596176	5124,721	V
1) TM	5530942	3	1843647	27,987	V
2) M	1104242	2	552121	8,381	V
3) TM * M	1178312	6	196385	2,981	V
Chyba	10408409	158	65876		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 5 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází k nárůstu hodnot sledované charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil rozdíl na hranici statistické významnosti u teploty modifikace 210 °C. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily



Graf 5 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $F_E$  dřeviny iroko



Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $F_P$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $F_P$  dřeviny iroko.

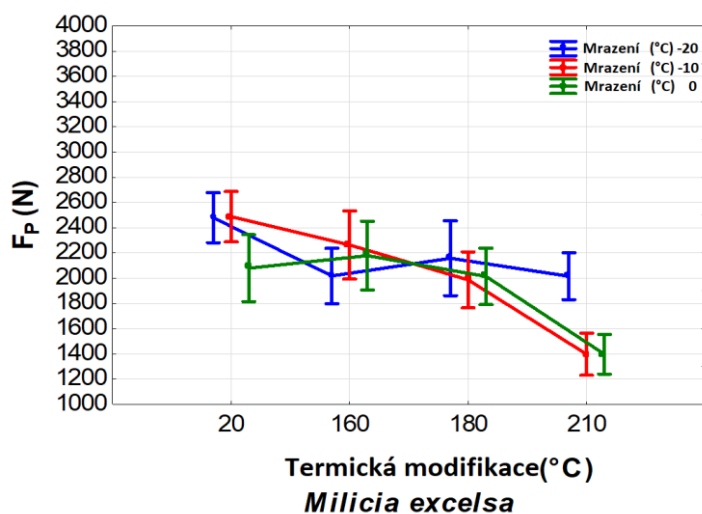
Tabulka 13 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $F_P$  dřeviny iroko

$F_P$ (mm) <i>Milicia excelsa</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	701478464	1	701478464	4335,297	V
1) TM	11979891	3	3993297	24,679	V
2) M	1749816	2	874908	5,407	V
3) TM * M	4063639	6	677273	4,186	V
Chyba	25565400	158	161806		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 6 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází nejprve k mírnému nárůstu při teplotě modifikace 160 °C, a při zvýšení teploty modifikace dochází k poklesu hodnot sledované charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil statisticky významný rozdíl u teploty modifikace 210 °C, kdy došlo ke statisticky významnému poklesu hodnot. Účinkem aplikace nízké teploty -10 °C se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily s výjimkou termické modifikace o teplotě 160 °C, kde nastalo snížení. Při aplikaci teploty -20 °C se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám nejprve zvýšily až po termickou modifikaci o teplotě 160 °C, po aplikaci vyšších teplot modifikace nastalo snížení sledované hodnoty



Graf 6 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $F_P$  dřeviny iroko

Průměrné hodnoty  $R_{\min B}$ ,  $R_{\min C}$ ,  $K_{ohB}$ ,  $K_{ohC}$  a hustoty pro dřevinu iroko jsou znázorněny v následující tabulce (hodnoty v závorkách jsou variačními koeficienty v %):

**Tabulka 14 - Střední hodnoty  $R_{\min B}$ ,  $R_{\min C}$ ,  $K_{ohB}$ ,  $K_{ohC}$  a hustoty pro dřevinu iroko**

<i>Milicia excelsa</i>							
Teplota modifikace (°C)	Chlazení vzorků (°C)	$R_{\min B}$	$R_{\min C}$	$K_{ohB}$	$K_{ohC}$	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	N
20	0	1400 (26,3)	1007 (17,4)	0,01 (18,2)	0,02 (20,3)	615 (13,7)	30
20	-10	1241 (15,7)	832 (15,6)	0,02 (17,7)	0,02 (17,6)	633 (10,9)	30
20	-20	1287 (14,5)	862 (14,4)	0,02 (12,6)	0,02 (12,5)	628 (9,0)	30
160	0	1555 (17,2)	1042 (17,2)	0,01 (18,7)	0,02 (18,6)	593 (11,1)	30
160	-10	1293 (21,2)	887 (18,6)	0,01 (18,6)	0,02 (20,1)	604 (10,9)	30
160	-20	1450 (24,1)	992 (21,6)	0,01 (22,7)	0,02 (21,5)	589 (11,6)	30
180	0	1610 (13,7)	1079 (13,6)	0,01 (14,4)	0,02 (14,3)	591 (11,7)	30
180	-10	1532 (19,9)	1026 (19,8)	0,01 (19,7)	0,02 (19,6)	579 (10,9)	30
180	-20	1502 (14,1)	1006 (14,1)	0,01 (15,7)	0,02 (15,7)	579 (11,5)	30
210	0	2210 (26,2)	1379 (11,0)	0,01 (19,8)	0,01 (15,6)	594 (12,5)	30
210	-10	1986 (24,0)	1368 (20,1)	0,01 (18,9)	0,01 (17,9)	580 (10,0)	30
210	-20	1502 (14,1)	1006 (14,1)	0,01(16,1)	0,02 (16,1)	583 (13,0)	30

Dle naměřených hodnot je zřejmé, že minimální poloměr ohybu  $R_{\min B}$  a  $R_{\min C}$  se při tepelné modifikaci zvyšuje. Při aplikaci nižších teplot se hodnoty nemodifikovaných dřevin nejprve snížily a po termické modifikaci se zvýšily. Hustota se při chlazení nemodifikovaných vzorků nepatrně zvýšila, ale po procesu modifikace se snížila.

**Tabulka 15 - Procentuální vyjádření změn naměřených charakteristik**

<i>Milicia excelsa</i>						
	$R_{\min B}$			$R_{\min C}$		
	0	-10	-20	0	-10	-20
20		-12%	-8%		-17%	-14%
160	11%	4%	13%	3%	7%	15%
180	15%	23%	17%	7%	23%	17%
210	58%	60%	17%	37%	64%	17%

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $R_{\min B}$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Následující grafy nám říkají, že minimální poloměr ohybu se zvyšuje statisticky významně díky zvyšujícím se teplotám aplikovaným během termické modifikace. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $R_{\min B}$  dřeviny iroko.

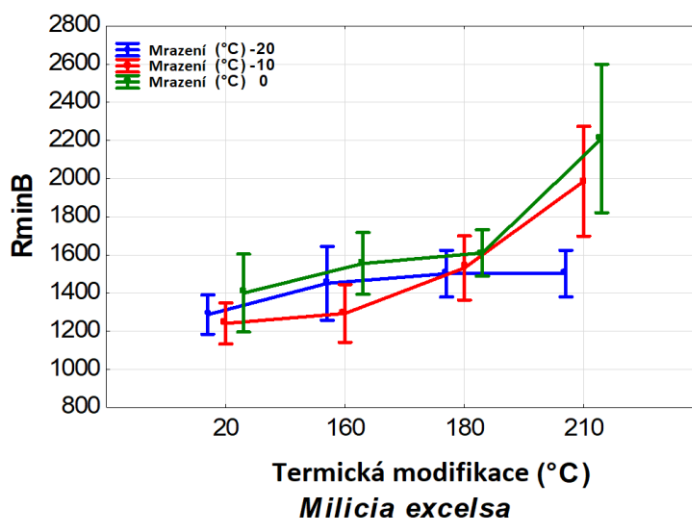
Tabulka 16 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $R_{\min B}$  dřeviny iroko

$R_{\min B}$ <i>Milicia excelsa</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	403565459	1	403565459	4046,596	V
1) TM	7739444	3	2579815	25,868	V
2) M	1934267	2	967133	9,698	V
3) TM * M	2392642	6	398774	3,999	V
Chyba	15757279	158	99730		

Příslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 7 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází ke zvýšení hodnot měřené charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil statisticky významný rozdíl u teploty modifikace 210 °C kdy došlo ke statisticky významnému zvýšení hodnot. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám snížily.



Graf 7 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $R_{\min B}$  dřeviny iroko

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $R_{\min C}$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $R_{\min C}$  dřeviny iroko.

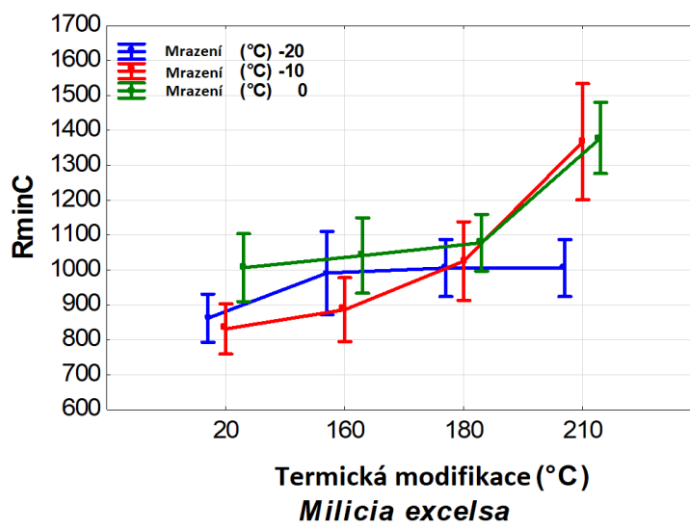
Tabulka 17 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $R_{\min C}$  dřeviny iroko

$R_{\min C}$ <i>Milicia excelsa</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	182446593	1	182446593	5966,961	V
1) TM	2727808	3	909269	29,738	V
2) M	716595	2	358297	11,718	V
3) TM * M	985367	6	164228	5,371	V
Chyba	4831029	158	30576		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 8 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází ke zvýšení hodnot měřené charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil statisticky významný rozdíl u teploty modifikace 210 °C kdy došlo ke statisticky významnému zvýšení hodnot. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám snížily s výjimkou aplikace -10 °C na modifikaci 210 °C, kde nastalo zvýšení.



Graf 8 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $R_{\min C}$  dřeviny iroko

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $K_{ohB}$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $K_{ohB}$  dřeviny iroko.

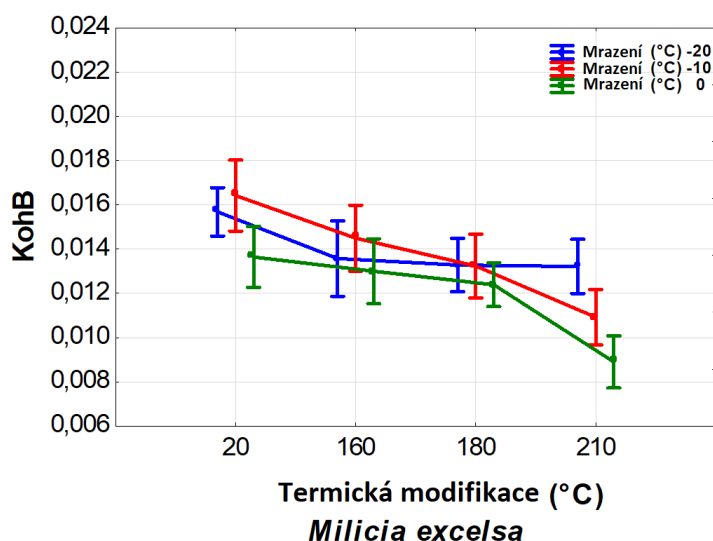
Tabulka 18 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $K_{ohB}$  dřeviny iroko

$K_{ohB}$ <i>Milicia excelsa</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	0,029497	1	0,029497	5171,521	V
1) TM	0,000379	3	0,000126	22,133	V
2) M	0,000128	2	0,000064	11,229	V
3) TM * M	0,000079	6	0,000013	2,297	V
Chyba	0,000901	158	0,000006		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 9 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází ke snížení hodnot měřené charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil statisticky významný rozdíl u teploty modifikace 210 °C kdy došlo ke statisticky významnému poklesu hodnot. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily.



Graf 9 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $K_{ohB}$  dřeviny iroko

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $K_{ohC}$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $K_{ohC}$  dřeviny iroko.

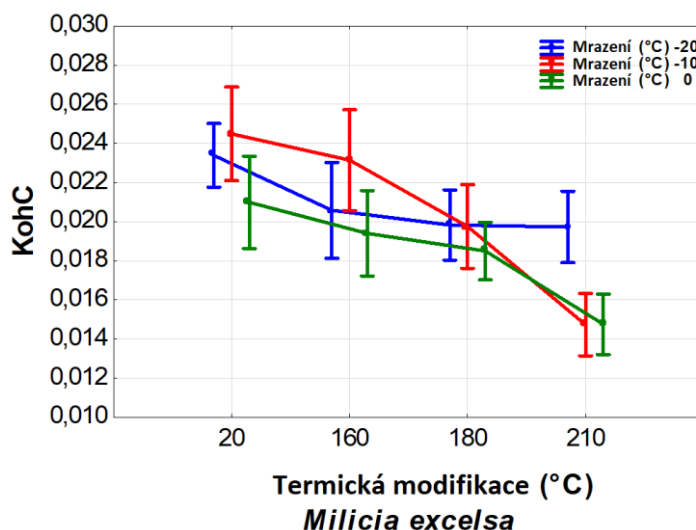
Tabulka 19 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $K_{ohC}$  dřeviny iroko

$K_{ohC}$ <i>Milicia excelsa</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	0,067011	1	0,067011	5123,729	V
1) TM	0,000943	3	0,000314	24,026	V
2) M	0,000195	2	0,000098	7,468	V
3) TM * M	0,00024	6	0,00004	3,053	V
Chyba	0,002066	158	0,000013		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 10 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází ke snížení hodnot měřené charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil statisticky významný rozdíl u teploty modifikace 210 °C kdy došlo ke statisticky významnému poklesu hodnot. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily s výjimkou aplikace -10 °C na modifikaci 210 °C, kde nastalo snížení.



Graf 10 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $K_{ohC}$  dřeviny iroko

## 7.2 Padouk

Průměrné hodnoty  $Y_E$ ,  $Y_P$ ,  $F_E$ ,  $F_P$  a hustoty pro dřevinu iroko jsou znázorněny v následující tabulce () (Hodnoty v závorkách jsou variačními koeficienty v %):

Tabulka 20 - Střední hodnoty  $Y_E$ ,  $Y_P$ ,  $F_P$ ,  $F_E$  a hustoty pro dřevinu padouk

<i>Pterocarpus soyauxii</i>							
Teplota modifikace (°C)	Chlazení vzorků (°C)	$Y_E$ (mm)	$Y_P$ (mm)	$F_E$ (N)	$F_P$ (N)	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	N
20	0	2,6 (10,4)	6,0 (19,3)	1749 (12,3)	3262 (18,8)	676 (27,0)	30
20	-10	2,3 (13,2)	5,9 (19,9)	1558 (17,5)	3219 (14,1)	689 (21,4)	30
20	-20	2,8 (9,9)	6,0 (19,4)	1831 (10,6)	3371 (16,4)	723 (5,4)	30
160	0	3,7 (16,3)	5,4 (20,1)	2346 (20,5)	3314 (20,2)	691 (5,5)	30
160	-10	3,8 (16,8)	5,3 (18,8)	2390 (13,2)	3210 (20,8)	686 (6,9)	30
160	-20	4,3 (19,3)	5,5 (17,4)	2539 (16,5)	3325 (21,8)	693 (4,2)	30
180	0	3,4 (19,3)	4,5 (20,2)	2174 (19,3)	2805 (21,8)	797 (3,7)	30
180	-10	2,3 (13,2)	5,6 (19,5)	1558 (17,5)	3286 (18,8)	702 (4,4)	30
180	-20	2,7 (9,9)	6,0 (20,1)	1826 (11,0)	3377 (16,9)	690 (3,4)	30
210	0	1,7 (12,5)	3,7 (17,4)	1245 (12,0)	1875 (18,6)	657 (5,6)	30
210	-10	1,9 (19,4)	3,4 (15,0)	1064 (20,6)	1768 (21,0)	676 (4,7)	30
210	-20	2,4 (18,2)	3,5 (9,4)	1374 (23,4)	1805 (19,1)	655 (2,7)	30

Dle naměřených hodnot je zřejmé, že měřené charakteristiky na mezi úměrnosti  $Y_E$  a  $F_E$  se při tepelné modifikaci zvyšují, ale při teplotě 210 °C se hodnoty snížily. Měřené charakteristiky  $Y_P$  se při tepelné modifikaci snižují, ale  $F_P$  se při teplotě 160 °C zvýšila, a poté nastal pokles hodnot. Hustota se při procesu modifikace zvýšila, ale při teplotě 210 °C se hustota oproti nemodifikovaným vzorkům snížila.

Tabulka 21 - Procentuální vyjádření změn naměřených charakteristik

<i>Pterocarpus soyauxii</i>															
	$Y_E$ (mm)			$Y_P$ (mm)			$F_E$ (N)			$F_P$ (N)			Hustota (kg/m <sup>3</sup> )		
	0	-10	-20	0	-10	-20	0	-10	-20	0	-10	-20	0	-10	-20
20		-12%	8%		-2%	0%		-11%	5%		-1%	7%		2%	7%
160	42%	65%	54%	-10%	-10%	-8%	34%	53%	39%	2%	0%	-1%	2%	-1%	-4%
180	31%	0%	-4%	-25%	-5%	0%	24%	0%	-1%	-14%	2%	0%	17%	2%	-5%
210	-35%	-17%	-14%	-38%	-42%	-42%	-29%	-38%	-25%	-43%	-55%	-54%	-3%	-2%	-9%

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $Y_E$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $Y_E$  dřeviny iroko.

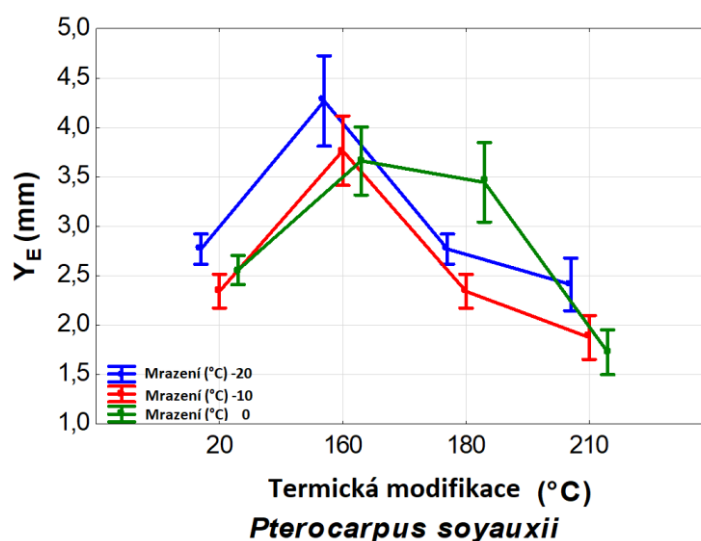
Tabulka 22 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $Y_E$  dřeviny padouk

$Y_E$ <i>Pterocarpus soyauxii</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	1231,14	1	1231,14	5340,983	V
1) TM	71,806	3	23,935	103,837	V
2) M	6,496	2	3,248	14,091	V
3) TM * M	9,083	6	1,514	6,568	V
Chyba	35,037	152	0,231		

Průslušný model vysvětluje zhruba 65 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 11 je zřejmé, že při teplotách termické modifikace 160 °C a 180 °C dochází ke statisticky významnému zvýšení hodnot sledované charakteristiky a při teplotě modifikace 210 °C nastává ke statisticky velmi významnému snížení. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily při teplotě modifikace 160 °C a poté se snížily s výjimkou aplikace -20 °C na modifikaci 210 °C, kde nastalo zvýšení.



Graf 11 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $Y_E$  dřeviny padouk



Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $Y_P$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $Y_P$  dřeviny padouk.

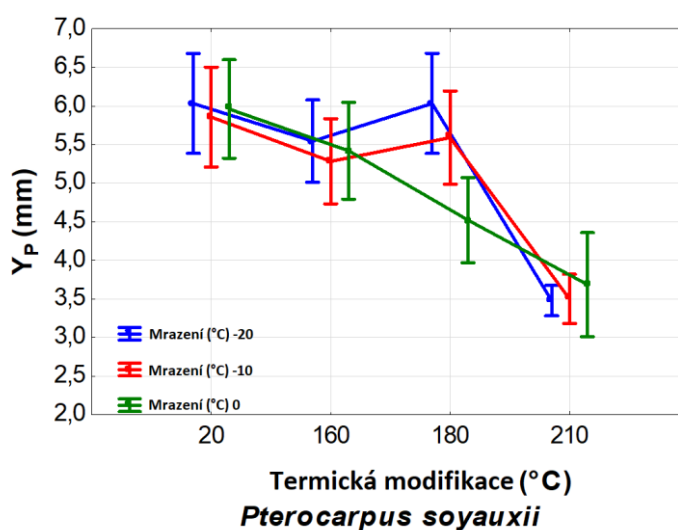
Tabulka 23 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $Y_P$  dřeviny padouk

$Y_P$ <i>Pterocarpus soyauxii</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	3965,453	1	3965,453	3977,726	V
1) TM	104,741	3	34,914	35,022	V
2) M	3,538	2	1,769	1,774	NV
3) TM * M	12,773	6	2,129	2,135	NV
Chyba	151,531	152	0,997		

Průslušný model vysvětluje zhruba 51,5 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 12 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází k poklesu hodnot sledované charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných při teplotě 160 °C a 180 °C těles se projevily statisticky nevýznamný pokles a stejně tak při teplotách modifikace 180 °C a 210 °C. Statisticky významný rozdíl je mezi teplotami modifikace 160 °C a 210 °C. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám snížily při teplotě modifikace 180 °C a 210 °C a při teplotě modifikace 180 °C se hodnoty zvýšily.



Graf 12 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $Y_P$  dřeviny padouk

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $F_E$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $F_E$  dřeviny padouk.

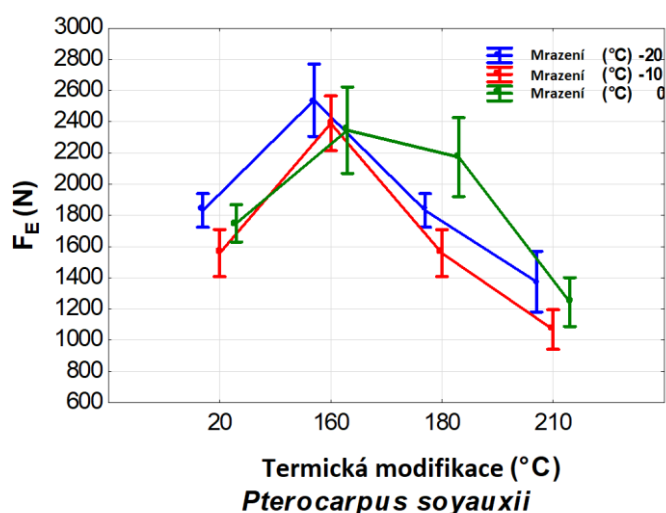
Tabulka 24 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $F_E$  dřeviny padouk

$F_E$ <i>Pterocarpus soyauxii</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	501680334	1	501680334	5215,896	V
1) TM	26183947	3	8727982	90,744	V
2) M	2180525	2	1090263	11,335	V
3) TM * M	1903924	6	317321	3,299	V
Chyba	14619811	152	96183		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 13 je zřejmé, že při teplotách termické modifikace 160 °C a 180 °C dochází ke statisticky významnému zvýšení hodnot sledované charakteristiky a při teplotě modifikace 210 °C nastává ke statisticky velmi významnému snížení. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšili při teplotě modifikace 160 °C a poté se snížily.



Graf 13 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $F_E$  dřeviny padouk

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $F_P$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $F_P$  dřeviny padouk.

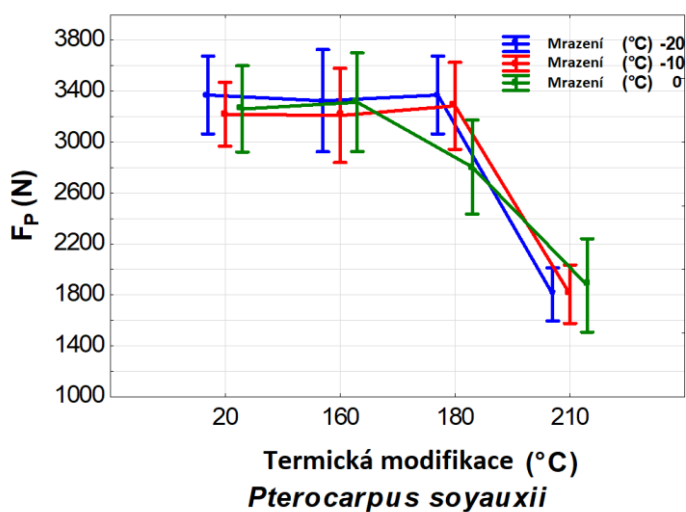
Tabulka 25 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $F_P$  dřeviny padouk

$F_P$ <i>Pterocarpus soyauxii</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	1,28E+09	1	1,28E+09	3927,059	V
1) TM	4,67E+07	3	1,56E+07	47,646	V
2) M	5,94E+05	2	2,97E+05	0,909	NV
3) TM * M	2,07E+06	6	3,46E+05	1,057	NV
Chyba	4,97E+07	152	3,27E+05		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 14 je zřejmé, že při teplotách termické modifikace 160 °C dochází ke statisticky nevýznamnému zvýšení hodnot sledované charakteristiky, při teplotě modifikace 180 °C nastává ke statisticky nevýznamnému snížení a při teplotě 210 °C nastává ke statisticky velmi významnému snížení. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám snížily s výjimkou termické modifikace o teplotě 180 °C, kde nastalo zvýšení.



Graf 14 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $F_P$  dřeviny padouk

Průměrné hodnoty  $R_{\min B}$ ,  $R_{\min C}$ ,  $K_{ohB}$ ,  $K_{ohC}$  a hustoty pro dřevinu iroko jsou znázorněny v následující tabulce (Hodnoty v závorkách jsou variačními koeficienty v %):

Tabulka 26 - Střední hodnoty  $R_{\min B}$ ,  $R_{\min C}$ ,  $K_{ohB}$ ,  $K_{ohC}$  a hustoty pro dřevinu padouk

<i>Pterocarpus soyauxii</i>							
Teplota modifikace (°C)	Chlazení vzorků (°C)	$R_{\min B}$	$R_{\min C}$	$K_{ohB}$	$K_{ohC}$	Hustota (kg/m <sup>3</sup> )	N
20	0	1346 (13,4)	789 (13,8)	0,02 (17,7)	0,03 (19,4)	676 (27,0)	30
20	-10	1324 (16,7)	847 (13,0)	0,02 (18,7)	0,02 (17,7)	689 (21,4)	30
20	-20	1230 (19,9)	824 (19,8)	0,02 (19,7)	0,03 (19,6)	723 (5,4)	30
160	0	1373 (20,4)	920 (20,4)	0,01 (20,3)	0,02 (20,2)	691 (5,5)	30
160	-10	1405 (20,0)	941 (19,9)	0,01 (18,8)	0,02 (18,7)	686 (6,9)	30
160	-20	1422 (19,4)	873 (13,5)	0,01 (21,1)	0,02 (15,2)	693 (4,2)	30
180	0	1647 (20,5)	1103 (20,5)	0,01 (20,2)	0,02 (19,5)	797 (3,7)	30
180	-10	1284 (18,3)	847 (13,3)	0,02 (30,3)	0,02 (16,4)	702 (4,4)	30
180	-20	1233 (20,5)	827 (20,5)	0,02 (20,4)	0,03 (20,4)	690 (3,4)	30
210	0	1996 (17,3)	1336 (17,3)	0,01 (17,8)	0,02 (17,7)	657 (5,6)	30
210	-10	2130 (17,4)	1426 (17,4)	0,01 (15,1)	0,01 (15,1)	676 (4,7)	30
210	-20	2088 (10,4)	1398 (10,4)	0,01 (10,2)	0,01 (9,8)	655 (2,7)	30

Dle naměřených hodnot je zřejmé, že minimální poloměr ohybu  $R_{\min B}$  a  $R_{\min C}$  se při tepelné modifikaci zvyšuje. Při aplikaci nižších teplot se hodnoty nemodifikovaných dřevin snížily u hodnoty  $R_{\min B}$  a u hodnoty  $R_{\min C}$  se zvýšily.

Tabulka 27 - Procentuální vyjádření změn naměřených charakteristik

<i>Pterocarpus soyauxii</i>						
	$R_{\min B}$			$R_{\min C}$		
	0	-10	-20	0	-10	-20
20		-2%	-9%		7%	4%
160	2%	6%	16%	17%	11%	6%
180	22%	-3%	0%	40%	0%	0%
210	48%	61%	70%	69%	63%	70%

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $R_{\min B}$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Následující grafy nám říkají, že minimální poloměr ohybu se zvyšuje statisticky významně díky zvyšujícím se teplotám aplikovaným během termické modifikace. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $R_{\min B}$  dřeviny padouk.

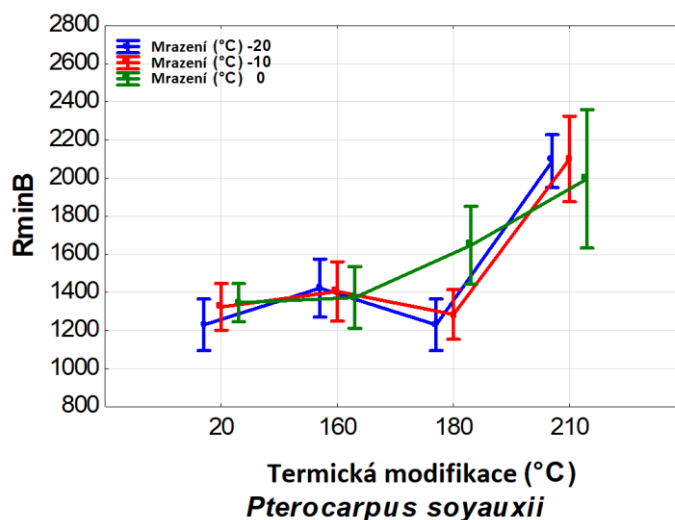
Tabulka 28 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $R_{\min B}$  dřeviny padouk

$R_{\min B}$ <i>Pterocarpus soyauxii</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	361120522	1	361120522	4987,511	V
1) TM	11422592	3	3807531	52,587	V
2) M	231883	2	115942	1,601	NV
3) TM * M	1205029	6	200838	2,774	V
Chyba	10933149	151	72405		

Příslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 15 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází ke zvýšení hodnot měřené charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil statisticky významný rozdíl mezi teplotami modifikace 160 °C a 210 °C kdy došlo ke statisticky významnému zvýšení hodnot. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily s výjimkou termické modifikace o teplotě 180 °C, kde nastalo snížení.



Graf 15 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $R_{\min B}$  dřeviny padouk

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $R_{minC}$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $R_{minC}$  dřeviny padouk.

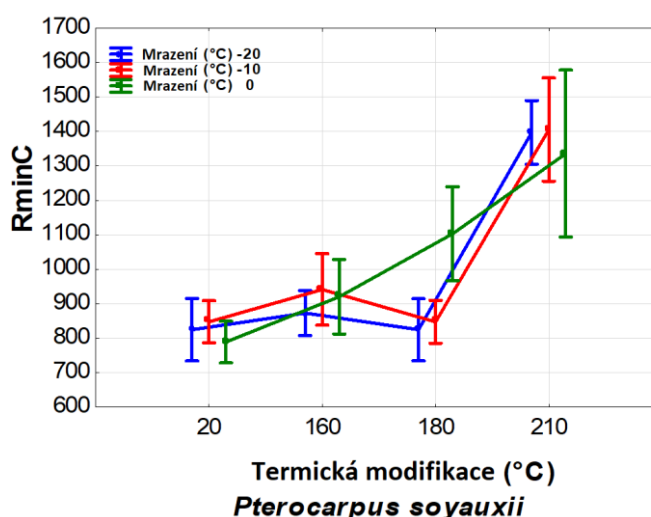
Tabulka 29 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $R_{minB}$  dřeviny padouk

$R_{minC}$ <i>Pterocarpus soyauxii</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	155643910	1	155643910	5525,372	V
1) TM	5868922	3	1956307	69,449	V
2) M	79816	2	39908	1,417	NV
3) TM * M	614384	6	102397	3,635	V
Chyba	4253511	151	28169		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 16 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází ke zvýšení hodnot měřené charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevily statisticky významný rozdíl mezi teplotami modifikace 160 °C a 210 °C, kdy došlo ke statisticky významnému zvýšení hodnot. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám zvýšily s výjimkou termické modifikace o teplotě 180 °C, kde nastalo snížení.



Graf 16 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $R_{minC}$  dřeviny padouk

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $K_{ohB}$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $K_{ohB}$  dřeviny padouk.

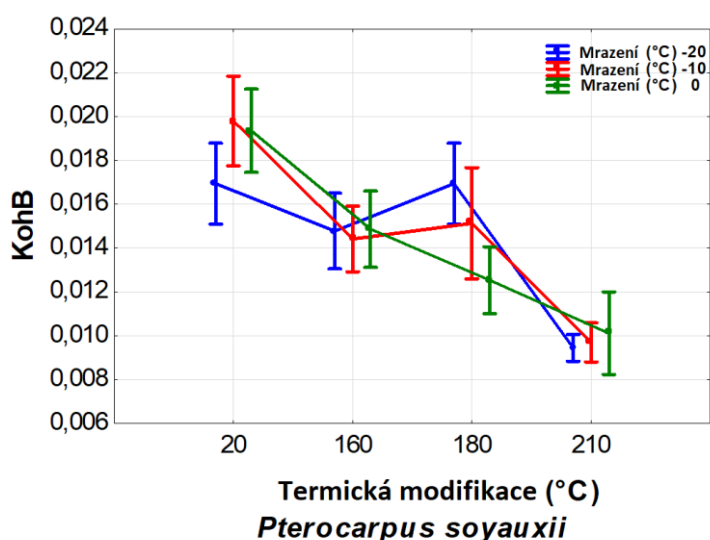
Tabulka 30 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $K_{ohB}$  dřeviny padouk

$K_{ohB}$ <i>Pterocarpus soyauxii</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	0,03214	1	0,03214	3351,513	V
1) TM	0,001379	3	0,00046	47,94	V
2) M	0,000007	2	0,000004	0,378	NV
3) TM * M	0,0002	6	0,000033	3,481	V
Chyba	0,001448	151	0,00001		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 17 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází ke snížení hodnot měřené charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevily statisticky významné rozdíly u teplot modifikace 160 °C a 210 °C kdy došlo ke statisticky významnému poklesu hodnot při teplotě 210°C. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám snížily s výjimkou termické modifikace o teplotě 180 °C, kde nastalo zvýšení.



Graf 17 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $K_{ohB}$  dřeviny padouk

Výsledky faktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv tepelné modifikace na hodnoty  $K_{ohC}$  jsou uvedeny v následující tabulce a grafu. Na základě úrovně významnosti „P“ můžeme konstatovat, že teplota tepelné modifikace má statisticky velmi významný vliv na  $K_{ohC}$  dřeviny padouk.

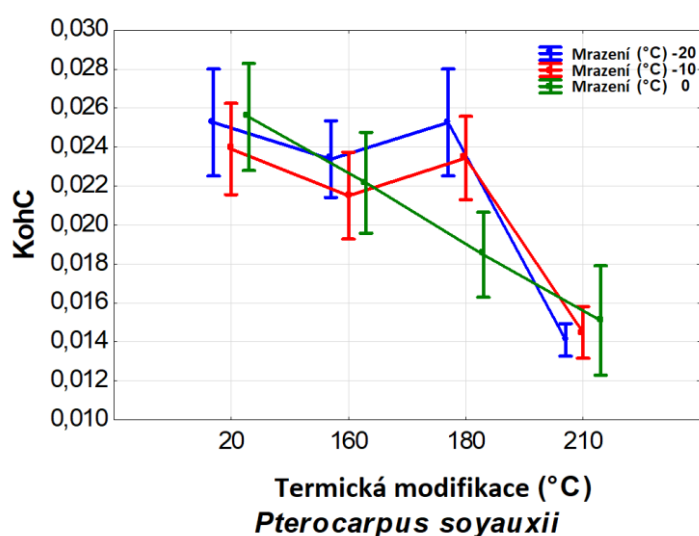
Tabulka 31 - Statistické vyhodnocení faktorů ovlivňujících  $K_{ohC}$  dřeviny padouk

$K_{ohC}$ <i>Pterocarpus soyauxii</i>					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F - Test	Hladina významnosti P
Intercept	0,068218	1	0,068218	4268,941	V
1) TM	0,001931	3	0,000644	40,285	V
2) M	0,000076	2	0,000038	2,388	NV
3) TM * M	0,000295	6	0,000049	3,082	V
Chyba	0,002429	152	0,000016		

Průslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového počtu čtverců.

NV – nevýznamný. V – významný. TM – termická modifikace (°C). M – mrazení (°C).

Z výsledků na grafu 18 je zřejmé, že účinkem teploty termické modifikace dochází ke snížení hodnot měřené charakteristiky. Mezi hodnotami tepelně modifikovaných těles se projevil statisticky významný rozdíl u teplot modifikace 160 °C a 210 °C kdy došlo ke statisticky významnému poklesu hodnot při teplotě 210°C. Účinkem aplikace nízkých teplot (-10, -20 °C) se hodnoty sledované charakteristiky oproti tělesům nepodrobeným nízkým teplotám snížily s výjimkou termické modifikace o teplotě 180 °C, kde nastalo zvýšení.



Graf 18 - Efekt termické modifikace a chlazení na změnu hodnot  $K_{ohC}$  dřeviny padouk



---

## 8 Závěr

Cílem práce bylo zjištění vlivu termické modifikace na vybrané ohybové charakteristiky termicky modifikovaných tropických dřevin iroko (*Milicia excelsa*) a padouk (*Pterocarpus soyauxii*). Pro vyhodnocení charakteristik byl použit nový software na identifikaci hraničních bodů napět'ově průběhového diagramu, který byl vyvinut Katedrou zpracování dřeva a biomateriálů. Výsledky poukazují na to, že teplota termické modifikace má pozitivně negativní vliv na měřené charakteristiky.

Z výsledků práce vyplívají následující závěry pro dřevinu iroko:

Hodnoty průhybu na mezi úměrnosti  $Y_E$ , síla na mezi úměrnosti  $F_E$  a minimální poloměry ohybu  $R_{minB}$  a  $R_{minC}$  vykazují zvýšení s teplotou termické modifikace oproti nemodifikovaným vzorkům. Hodnoty průhybu na mezi pevnosti  $Y_P$  a koeficienty ohybatelnosti  $K_{ohB}$  a  $K_{ohC}$  vykazují snížení s teplotou termické modifikace oproti nemodifikovaným vzorkům. U síly na mezi pevnosti  $F_P$  došlo při teplotě modifikace 160 °C nejprve ke statisticky nevýznamnému zvýšení, a poté hodnoty charakteristiky vykazují pokles s teplotou modifikace.

Z výsledků práce vyplívají následující závěry pro dřevinu padouk:

Hodnoty průhybu na mezi úměrnosti  $Y_E$ , síla na mezi úměrnosti  $F_E$  rostou při teplotách modifikace 160 °C a 180 °C, a poté hodnoty charakteristiky vykazují pokles oproti nemodifikovaným vzorkům. Hodnoty průhybu na mezi pevnosti  $Y_P$  vykazují snížení s teplotou termické modifikace oproti nemodifikovaným vzorkům. U síly na mezi pevnosti  $F_P$  došlo při teplotě modifikace 160 °C nejprve ke statisticky nevýznamnému zvýšení, a poté hodnoty charakteristiky vykazují snížení s teplotou modifikace. Hodnoty minimálních poloměrů ohybu  $R_{minB}$  a  $R_{minC}$  vykazují růst s teplotou termické modifikace oproti nemodifikovaným vzorkům, zatímco koeficienty ohybatelnosti  $K_{ohB}$  a  $K_{ohC}$  s teplotou termické modifikace klesají.

Podle naměřených výsledků můžeme tvrdit, že teploty termické modifikace 160 °C a 180 °C zlepšují hodnoty na mezi úměrnosti, tudíž praktické využití těchto upravených exotických dřevin může být zahradní a interiérový nábytek unikátního vzhledu, terasová prkna a fasádní prkna. Naměřené hodnoty minimálních poloměrů ohybu nám napovídají, že s teplotou termické modifikace stoupá minimální poloměr ohybu, tudíž je možná výroba tvarovaných produktů.

---

Doporučením pro další výzkum dřevin iroko a padouk je zjistit změny chemických komponentů způsobené vlivem vyšších teplot a analyzovat korelace mezi teplotou termické modifikace, chemickými komponenty a sledovanými charakteristikami.

---

## Seznam použité literatury a zdrojů

**ARA - továrna na nábytek a.s. Iroko.** *www.arakolin.cz.* [Online]

<http://www.arakolin.cz/cs/dreviny/iroko>.

**Aškenazi, K.E. a Ganov, V.A. 1972.** *Anizotropija konstrukcionnych materialov.*

Moskva : autor neznámý, 1972.

**Böhm, M., Reisner, J. a Bomba, J. 2012.** *Materiály na bázi dřeva.* 1. vyd. Praha :

Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6.

**Bodig, J., a Jayne, B. A. 1982.** *Mechanics of wood and wood composites,* Van

Nostrand Reinhold: New York, USA 712 p., ISBN: 978-0442008222

**Cirad. 2012.** Tropix 7 Cirad. *tropix.cirad.fr.* [Online] 2012.

<https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/EN/Africa/IROKO.pdf>.

**Cirad. 2012.** Tropix 7 Cirad. *tropix.cirad.fr.* [Online] 2012.

<https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/EN/Africa/PADOUK.pdf>

**Čekovská, H., a další. 2017.** *Tectona grandis Linn. and its fire characteristics affected by its thermal modification of wood.* Bioresources.cnr.ncsu.edu. [Online] 2017.

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/tectona-grandis-linn-and-its-fire-characteristics-affected-by-its-thermal-modification-of-wood/>. 2805-2817.

**Esteves, B., Domingos, I. a Pereira, H. 2008.** *Pine wood modification by heat treatment in air.* ojs.cnr.ncsu.edu. [Online] 2008.

[http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes\\_03\\_1\\_0142\\_Esteves\\_DP\\_PineWoodMod](http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_03_1_0142_Esteves_DP_PineWoodMod). 1930-2126.

**Gaff, M., a Gašparík, M. 2015.** "Effect of cyclic loading on modulus of elasticity of aspen wood," BioResources 10(1), 290-298. DOI: 10.15376/biores.10.1.290-298.

**Gaff, M.; Vokaty, V.; Babiak, M.; Beki, C.B. 2016.** "Coefficient of wood bendability as a function of selected factors". Construction and building materials. 126 (2016). 632-640.

**Gaff, M. a Babiak, M. 2017** Composite Structures (2017),

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.036>

**Gaff, M. a Babiak, M. 2018.** "Tangent modulus as a function of selected factors,"

Composite Structures. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.052>

- 
- Gandelová, L., Šlezingerová, J. a Horáček, P. 2009.** *Nauka o dřevě*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.
- Gašparík, M. 2018.** *Technické materiály na bázi dřeva II. - Modifikované dřevo*. [Prezentace] Praha : Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, 2018.
- Gašparík, M., Barcík, Š. a Horejš, P. 2014.** *Influence of Thermal Modification on Nail Withdrawal Strength of Spruce Wood*. *Researchgate.net*. [Online] 2014.  
[https://www.researchgate.net/figure/Phases-of-thermal-modification-for-final-temperature-140-C\\_fig7\\_264778299](https://www.researchgate.net/figure/Phases-of-thermal-modification-for-final-temperature-140-C_fig7_264778299).
- Hill, C. 2006.** *Wood Modification - Chemical, Thermal and Other Processes*. Chichester : John Wiley & Sons LTD, 2006. ISBN 978-0-470-02172-9.
- Ibach, R., Rowell, R., Lee, B. 2001** *Decay protection based on moisture exclusion resulting from chemical modification of wood*. Forest Products Laboratory [online]. 2001-12-04. <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2000/ibach00c.pdf>>
- International ThermoWood Association. 2003.** *thermowood.fi*. [Online] 2003.  
[https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw\\_handbook\\_080813.pdf](https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf).
- Josten, E., Reiche, T. a Wittchen B. 2010** *Dřevo a jeho obrábění*. Grada, 2010. ISBN 978-80-247-2961
- Mackes, K. H., and Lynch, D. L. 2001.** “*The effect of aspen wood characteristics and properties on utilization,*” in: *Sustaining Aspen in Western Landscapes: Symposium Proceedings* June 2000, Grand Junction, CO.  
[https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs\\_p018.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p018.pdf)
- Militz, H. a Tjeerdsma, B. 2001.** *Heat treatment of wood in Germany - state of the art*. *Thermotreatedwood.com*. [Online] 2001.  
<http://www.thermotreatedwood.com/Worldwide/Germany.pdf>.
- Navi, P. a Sandberg, D. 2012.** *Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood*. Lausanne : EPFL Press, 2012. ISBN 978-2-940222-41-1.
- NIS. 2013.** Nábytkářský informační server. *www.n-i-s.cz*. [Online] 2013.  
<http://www.n-i-s.cz/cz/modifikovane-drevo/page/217/#>.
- Pánek, M. a Reinprecht, L. 2008.** *Bio-treatment of spruce wood for improving of its permeability and soaking - Part 1: Direct treatment with the bacterium Bacillus subtilis*.
-

---

researchgate.net. [Online] 2008

[https://www.researchgate.net/publication/298521750\\_Bio-treatment\\_of\\_spruce\\_wood\\_for\\_improving\\_of\\_its\\_permeability\\_and\\_soaking\\_-\\_Part\\_1\\_Direct\\_treatment\\_with\\_the\\_bacterium\\_Bacillus\\_subtilis](https://www.researchgate.net/publication/298521750_Bio-treatment_of_spruce_wood_for_improving_of_its_permeability_and_soaking_-_Part_1_Direct_treatment_with_the_bacterium_Bacillus_subtilis).

**PlatoWood. 2019.** *The PlatoWood Process*. platowood.com. [Online] 2019.

[https://www.platowood.com/upload\\_directory/uploads/the-platowood-process.pdf](https://www.platowood.com/upload_directory/uploads/the-platowood-process.pdf).

**Qijuk Research Centre. 2013.** *Pannaq OHT Wood - The process*. qijuk.com. [Online] 2013. <http://qijuk.com/pannaq>.

**Reinprecht, L. a Vidholdová, Z. 2008.** *Termodrevo - príprava, vlastnosti a aplikácie*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.

**Reinprecht, L. 2008.** *Ochrana dreva*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1863-6.

**Stojčev, A. 1979.** *Lignamon - zušlechtěné dřevo*. Praha : VVÚD, 1979.

**Svatoň, J. 2000.** *Ochrana dřeva*. Brno : MZLU, 2000. ISBN 80-7157-435-X.

**Svoboda, T., Gaffová Z., Rajnoha, R., Šatanová, A., and Kminiak, R. 2017.**

“*Bending Forces at the Proportionality Limit and the Maximum – Technological Innovations for Better Performance in Wood Processing Companies*,” *BioResources* 12(2), 41464165. DOI: 10.15376/biores.12.2.4146-4165

**The Wood Database.** *wood-database.com*. [Online] <https://www.wood-database.com/african-padauk/>.

**The Wood Database.** *wood-database.com*. [Online] <https://www.wood-database.com/iroko/>.

**Vernois, M.** *Heat treatment of wood in France - state of the art*.

*thermallytreatedwood.com*. [Online]

<http://www.thermallytreatedwood.com/Worldwide/France.pdf>.

**Wiemann, M. C. 2010.** *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material, Centennial edition*, Forest Product Laboratory, Madison, WI, USA, [Online]

[https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr190.pdf](https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf)

**Xie, Y., a další. 2013.** *Effects of chemical modification on the mechanical properties of wood*. *link.springer.com*. [Online] 2013

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00107-013-0693-4>.

---

## **Normy**

**EN 310 (1993).** “Wood-based panels -- Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength,” *European Committee for Standardization*, Brussels, Belgium.

**ISO 13061-1 (2014).** “Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests,” *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland

**ISO 13061-2 (2014).** “Physical and mechanical properties of wood -- Test methods for small clear wood specimens -- Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests,” *International Organization for Standardization*, Geneva, Switzerland.