

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fakulta lesnická
a dřevařská**

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

2018

Lukáš Jeroušek

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:

Prezenční

Pracoviště (katedra/ústav):

Katedra základního zpracování dřeva

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Praha 2018

Lukáš JEROUŠEK

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

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

Podpis autora

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lukáš Jeroušek

Dřevařství

Název práce

Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky modifikovaného tropického dřeva.

Název anglicky

Physical and mechanical properties of thermally modified tropical wood

Cíle práce

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

Metodika

1. Úvod
2. Analýza problematiky - vliv stupně termické modifikace na změny fyzikálních a mechanických vlastností různých druhů termicky modifikovaných dřevin.
3. Přínosy a doporučení
4. Závěr

Doporučený rozsah práce

60

Klíčová slova

Termicky modifikované dřevo, Thermowood,

Doporučené zdroje informací

1. REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ Z.; 2008. Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikace. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.
2. Yang, H. et al. 2015.: Wood Modification at High Temperature and Pressurized Steam: a Relational Model of Mechanical Properties Based on a Neural Network

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff , PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

Ing. Jiří Kubš

Elektronicky schváleno dne 20. 11. 2017

doc. Ing. Milan Gaff , PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 12. 2. 2018

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2018

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je ze-sumarizovat poznatky o vlivu termické modifikace na fyzikálně – mechanické vlastnosti různých druhů termicky modifikovaných tropických dřevin. Konkrétně se jedná o tropické dřeviny Meranti (*Shorea*) a Merbau (*Intsia Bijuga*), u kterých byly sledovány následující vlastnosti: rázová houževnatost a nasákavost dřeva. U nasákavosti dřeva byly dále sledovány charakteristiky jako je změna objemu, hmotnosti, rozměrů a hustoty. Všechna naměřená data byla statisticky zpracována a popsána. Podle tohoto vyhodnocení se dospělo k výsledku, že vlivem termické modifikace Meranti ztrácí svou pevnost v ohybu a pomalu klesá i hustota. U Merbau se termickou modifikací dala pevnost zvýšit za stálého klesání hustoty. Od teploty 180°C rapidně ztrácí svou pevnost i hustotu. Na nasákavost má termická modifikace pozitivní vliv u Meranti, již od nejnižší teploty modifikace (160°C) dochází k ubývání nárůstu hmotnosti i objemu. U Merbau nemá termická modifikace žádný pozitivní vliv.

Klíčová slova: thermowood, termická modifikace, tropické dřeviny

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to summarize the knowledge about the influence of thermal modification on the physical and mechanical properties of different types of thermally modified tropical wood. Specifically, these are Meranti (*Shorea*) and Merbau (*Intsia Bijuga*), and this properties was research: impact bending strength and absorption. By absorption have been further studied characteristics such as volume, weight, dimensions and density changes. All measured data were statistically processed and reported. According to this evaluation, the result is that due to thermal modification Meranti loses bending strength and slowly decreases the density. At Merbau, the thermal modification allowed the strength to increase under steady decreasing density. From 180°C, it quickly loses strength and density. Absorption has a positive effect by thermal modification for Meranti, since the lowest temperature of the modification (160°C), there has been a decrease weight and volume changes. At Merbau the thermal modification hasn't got any positive effect.

Keywords: thermowood, thermally modification, tropical woods

Obsah

Obsah	6
Seznam ilustrací	8
Seznam tabulek	9
Seznam zkratk	10
Slovník termínů	11
1 Cíl práce	12
2 Úvod	13
3 Vlastnosti dřeva	14
3.1 Fyzikální vlastnosti dřeva	14
3.1.1 Vlhkost	14
3.1.2 Hustota	16
3.2 Mechanické vlastnosti dřeva	18
3.2.1 Pevnost	18
4 Termická modifikace	20
4.1 Termická modifikace zkušebních vzorků	22
5 Tropické dřeviny	24
5.1 Merbau (<i>Intsia Bijuga</i>)	25
5.1.1 Makroskopická stavba	25
5.1.2 Mikroskopická stavba	25
5.1.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti	26
5.2 Meranti (<i>Shorea</i>)	26
5.2.1 Makroskopická stavba	26
5.2.2 Mikroskopická stavba	27
5.2.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti	27
6 Rázová houževnatost	28
6.1 Materiál	28
6.2 Metodika	29
6.3 Vyhodnocení	32
7 Nasákavost	37
7.1 Materiál	37
7.2 Metodika	38
7.3 Výpočet změn sledovaných charakteristik	38

7.4	Vyhodnocení.....	40
7.4.1	Statistické vyhodnocení závislosti termické modifikace na změny hodnot sledovaných charakteristik.	41
7.4.2	Srovnání účinků jednotlivých faktorů za použití Duncanova testu na změnu hodnot sledovaných charakteristik.....	45
8	Závěr.....	52
9	Seznam použité literatury.....	53

Seznam ilustrací

OBR. 1 FÁZE TERMICKÉ MODIFIKACE	21
OBR. 2 PROCES TERMICKÉ MODIFIKACE MERANTI (<i>SHOREA</i>)	22
OBR. 3 PROCES TERMICKÉ MODIFIKACE MERBAU (<i>INTSIA BIJUGA</i>)	22
OBR. 4 SMĚRY ŘEZŮ A ROZMĚRY ZKUŠEBNÍCH TĚLES	28
OBR. 5 CHARPYHO KLADIVO	30
OBR. 6 VLIV TEPLoty TERMICKÉ MODIFIKACE NA HODNOTY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI.	33
OBR. 7 VLIV DRUHU DŘEVINY NA HODNOTY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	34
OBR. 8 SYNERGICKÝ EFEKT TEPELNÉ MODIFIKACE A DRUHU DŘEVINY NA RÁZOVOU HOUŽEVNATOST	34
OBR. 9 GRAF KORELACE RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI A HUSTOTY MERANTI	36
OBR. 10 GRAF KORELACE RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI A HUSTOTY MERBAU	36
OBR. 11 ROZMĚRY ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO VYHODNOCENÍ NASÁKAVOSTI	37
OBR. 12 VLIV TERMICKÉ MODIFIKACE NA PŘÍRŮSTEK HMOTNOSTI PŘI PONOŘENÍ TĚLESA DO VODY	49
OBR. 13 VLIV TERMICKÉ MODIFIKACE NA PŘÍRŮSTEK OBJEMU PŘI PONOŘENÍ TĚLESA DO VODY	49
OBR. 15 VLIV TERMICKÉ MODIFIKACE NA PŘÍRŮSTEK HUSTOTY PŘI PONOŘENÍ TĚLESA DO VODY	50
OBR. 16 VLIV TERMICKÉ MODIFIKACE NA ZMĚNU ROZMĚRŮ V RADIÁLNÍM SMĚRU PŘI PONOŘENÍ TĚLESA DO VODY.....	50
OBR. 17 VLIV TERMICKÉ MODIFIKACE NA ZMĚNU ROZMĚRŮ V TANGENCIÁLNÍM SMĚRU PŘI PONOŘENÍ TĚLESA DO VODY.....	50
OBR. 18 VLIV TERMICKÉ MODIFIKACE NA ZMĚNU ROZMĚRŮ V PODÉLNÉM SMĚRU PŘI PONOŘENÍ TĚLESA DO VODY.....	51

Seznam tabulek

TABULKA 1 TŘÍDY ODOLNOSTÍ RŮZNÝCH DRUHŮ DŘEVIN	21
TABULKA 2 FÁZE A PARAMETRY TERMICKÉ MODIFIKACE MERANTI (<i>SHOREA</i>)	23
TABULKA 3 FÁZE A PARAMETRY TERMICKÉ MODIFIKACE MERBAU (<i>INTSIA BIJUGA</i>)	23
TABULKA 4 ZÁKLADNÍ STATISTICKÁ ANALÝZA RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI	32
TABULKA 5 VLIV PRVKŮ A JEJICH VZÁJEMNÉ PŮSOBNÍ NA RÁZOVOU HOUŽEVNATOST	33
TABULKA 6 SROVNÁNÍ EFEKTU DRUHU DŘEVIN NA RÁZOVOU HOUŽEVNATOST PŘI POUŽITÍ DUNCANOVA TESTU	35
TABULKA 7 SPEARMANOVA KORELACE PRO HODNOTY RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI A HUSTOTY	35
TABULKA 8 PRŮMĚRNÉ ZMĚNY HODNOT SLEDOVANÝCH CHARAKTERISTIK PO DOBU 96 HODIN.	40
TABULKA 9 VÍCE FAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU HODNOTÍCÍ ZMĚNU HMO TNOSTI [G] PO DOBU 96 HODIN.	41
TABULKA 10 VÍCE FAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU HODNOTÍCÍ ZMĚNU OBJEMU [MM ³] PO DOBU 96 HODIN.	42
TABULKA 11 VÍCE FAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU HODNOTÍCÍ ZMĚNU HUSTOTY [KG/M ³] PO DOBU 96 HODIN.	42
TABULKA 12 VÍCE FAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU HODNOTÍCÍ ZMĚNU ROZMĚRŮ V RADIÁLNÍM SMĚRU [MM] PO DOBU 96 HODIN.	43
TABULKA 13 VÍCE FAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU HODNOTÍCÍ ZMĚNU ROZMĚRŮ V TANGENCIÁLNÍM SMĚRU [MM] PO DOBU 96 HODIN.	44
TABULKA 14 VÍCE FAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU HODNOTÍCÍ ZMĚNU ROZMĚRŮ V PODÉLNÉM SMĚRU [MM] PO DOBU 96 HODIN.	44
TABULKA 15 ZMĚNA HMO TNOSTI [G] PO 96 HODINÁCH	45
TABULKA 16 ZMĚNA OBJEMU [MM ³] PO 96 HODINÁCH	46
TABULKA 17 ZMĚNA HUSTOTY [KG/M ³] PO 96 HODINÁCH.	46
TABULKA 18 ZMĚNA ROZMĚRŮ V RADIÁLNÍM SMĚRU [MM] PO 96 HODINÁCH.	47
TABULKA 19 ZMĚNA ROZMĚRŮ V TANGENCIÁLNÍM SMĚRU [MM] PO 96 HODINÁCH.	48
TABULKA 20 ZMĚNA ROZMĚRŮ V PODÉLNÉM SMĚRU [MM] PO 96 HODINÁCH	48

Seznam zkratk

TM – termická modifikace

DV – dřevěný vzorek

BNV – bod nasycení vláken

RH – rázová houževnatost

Slovník termínů

Vlhkost dřeva – Vlhkost dřeva je definována jako podíl hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v suchém stavu. Dřevo má při teplotě 20°C a relativní vlhkosti vzduchu 65% vlhkost 12%. (Zejda, Tippner, Sebera, Koňasová, & Dániel, 2015)

Bobtnání – Bobtnáním nazýváme schopnost dřeva zvětšovat své rozměry, plochu nebo objem při přijímání vázané vody v rozsahu vlhkosti 0 % - BNV. (Horáček, 2008)

Bod nasycení vláken – BNV lze popsat jako situaci, kdy dochází v buněčné stěně k úplnému nasycení vodou, ale v lumenu buňky se nenachází voda žádná. (Horáček, 2008)

Sesýchání – Sesýchání je proces, při kterém dochází ke zmenšování rozměrů, objemu nebo plochy v důsledku ztráty vody vázané. (Horáček, 2008)

Voda vázaná – Voda vázaná se objevuje v buněčných stěnách, z důvodu vázání se vodíkovými vazbami k OH skupinám celulózy a hemicelulóz. Ve dřevě je pouze při vlhkostech v intervalu od 0 do 30 %. Při charakterizování mechanických a fyzikálních vlastností má vysoký význam. (Zejda, Tippner, Sebera, Koňasová, & Dániel, 2015)

Voda volná – Voda volná se narodí od vody vázané nalézá v lumenu buňky a mezibuněčných prostorech. Ve dřevě se vyskytuje až po překročení BNV, tedy přibližně při 30% vlhkosti. Při posuzování mechanických a fyzikálních vlastností má výrazně menší význam. (Zejda, Tippner, Sebera, Koňasová, & Dániel, 2015)

Hustota dřeva – Hustota je definována jako podíl hmotnosti a objemu dřeva. Pro výpočty a porovnání se používá hustota v suchém stavu (při vlhkosti dřeva 0%). (Horáček, 2008)

1 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je ze-sumarizovat poznatky o vlivu termické modifikace na fyzikální a mechanické vlastnosti různých druhů termicky modifikovaných tropických dřevin, určit závislost mezi teplotou modifikace a změnou vlastností dřeva, také zjistit změny vlastností termické modifikace na druhu tropické dřeviny.

2 Úvod

Výrobky ze dřeva a dřevěné konstrukce vyrábějí a používají lidé již několik staletí. Od jednoduchých prvků jako např. násady nebo sirky až po složitější konstrukce jako jsou třeba krovy, mlýnská kola či vozy. Dřevo je obnovitelná surovina, oproti ostatním konstrukčním materiálům je lehce opracovatelné, má výborný poměr pevnost – hmotnost a široké uplatnění. Z takto všestranného materiálu jsme schopni vyrobit téměř cokoliv. Roztřískováním dřeva dokážeme vytvořit plošné materiály, rozvlákněním celulózy vyrobit papír, případně další materiály na bázi dřeva. Splením jednotlivých dřevěných prvků jsme schopni vyrobit nosníky do sportovních hal. Jak je vidět, všude okolo nás jsou výrobky ze dřeva. Denně s ním pracují lidé ve dřevozpracujících podnicích, při výrobě nábytku, v architektuře, dokonce i při relaxaci v sauně či sportování, kde se vyrábějí tenisové rakety, lyže, pingpongové stoly i pálky. Přírodní materiály jsou, i přes své nevýhody, stále oblíbenější. V některých odvětvích se používání dřeva ale stále neupřednostňuje. Proto je výborným způsobem úprava dřeva. Vařením nebo mikrovlnným ohřevem se dá dřevo snadno ohýbat, termickou modifikací zase získá rozměrovou i tvarovou stálost. Například termická modifikace je jedním ze způsobů, jak využít dřevo na obklady fasád a terasy k bazénům bez dalších aplikací nátěrových hmot. Termickou modifikací se dají také upravovat jak mechanické, tak fyzikální vlastnosti dřeva.

3 Vlastnosti dřeva

Dřevo, jakožto obnovitelný zdroj energie, a nehomogenní, organický, anizotropní, hygroskopický, porézni materiál je vhodný jak pro venkovní, tak i vnitřní využití. Hojně se dřevo využívá ke konstrukčním, ale i estetickým či jiným specifickým účelům. Konkrétní využití však závisí zejména na vlastnostech jednotlivých dřevin, které lze obecně rozdělit na fyzikální a mechanické. (Macháček)

3.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

Základní fyzikální vlastnosti lze rozdělit na základě toho, zda popisují vnější vlastnosti dřeva (barva), vnitřní (hustota) anebo jeho reakci na různé fyzikální jevy (teplota, vlhkost). Právě vlhkost je společně s hustotou jednou z nejdůležitějších vlastností. (MEZISTROMY, 2016)

3.1.1 Vlhkost

Dřevo označujeme jako hygroskopický materiál vzhledem k jeho schopnosti přijímat či odevzdávat vodu dle vlhkosti okolního prostředí, a to v plynném i kapalném skupenství. Samo o sobě dokáže dřevo přijímat i jiné plyny a kapaliny, ovšem voda figuruje jako nejdůležitější element ovlivňující jeho vlhkost. Právě přítomnost různých kapalin ve struktuře dřeva, zejména tedy vody, nazýváme vlhkost dřeva.

Rozlišujeme vlhkost absolutní (w_{abs}), tedy podíl hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v jeho absolutně suchém stavu, kterou vypočítáme dle matematického vzorce

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

kde m_w je hmotnost vlhkého dřeva [kg, g], m_0 je hmotnost absolutně suchého dřeva [kg, g] a m_w je hmotnost vody v kg nebo g.

a vlhkost relativní (w_{rel}), která označuje podíl hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva a vypočítá se jako

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \times 100 \quad [\%]$$

kde m_w je hmotnost vlhkého dřeva [kg, g], m_0 je hmotnost absolutně suchého dřeva [kg, g] a m_w je hmotnost vody v kg nebo g. (Horáček, 2008)

Pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností dřeva jsou využívány hodnoty absolutní vlhkosti, zatímco v praxi jsou více uplatňovány hodnoty vlhkosti relativní, neboť například při nákupu či prodeji dřeva, kdy dřevo není absolutně suché, je žádoucí znát procentuální zastoupení vody z jeho celkové hmotnosti.

Vodu vyskytovanou ve dřevě rozlišujeme dle jejího uložení jako:

- a) chemicky vázaná voda - součástí chemických sloučenin, vyskytuje se i při nulové absolutní vlhkosti a nelze ji tedy odstranit sušením, pouze spálením. Představuje 1-2 % z celkové sušiny dřeva. Z hlediska charakteristiky fyzikálních a mechanických vlastností dřeva nemá význam.
- b) vázaná voda - nachází se v buněčných stěnách, je vázaná vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny. Vyskytuje se u dřeva s vlhkostí 0-30 %. Vázaná voda je nejzásadnější při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností.
- c) volná voda - vyplňuje lumény buněk a mezibuněčné prostory, ve dřevě je přítomna až po nasycení vázanou vodou, tedy při vlhkosti 30-200 % (do maximální vlhkosti dřeva). Na fyzikální a mechanické vlastnosti nemá významný vliv.

Na základě určení meze hygroskopicity anebo meze nasycení buněčných stěn lze stanovit hraniční hodnotu, jež odděluje vázanou a volnou vodu, přičemž pro stanovení meze hygroskopicity je dřevo vystavováno vodě v plynném skupenství (vzduch s relativní vlhkostí blízkou nasycení) a klesá s rostoucí teplotou okolního prostředí. Mez nasycení buněčných stěn nastává tehdy, kdy jsou buněčné stěny zcela vyplněny vodou a ve dřevě je tak obsažena jen voda vázaná, a to za předpokladu, že dřevo bylo dlouhodobě vystavováno vodě v kapalném skupenství (bylo v ní ponořeno). V tomto případě nemá teplota prostředí vliv. (Gandelová, 2009)

Množství vody ve dřevě se může zvyšovat i snižovat v závislosti na jeho úpravě a zpracování, ovšem díky hygroskopicitě obsahuje dřevo určitý podíl vody vždy, což způsobuje změny v hustotě, únosnosti, rozměrové změny a další změny ve fyzikálních i mechanických vlastnostech, také je ovlivněna odolnost vůči napadení hmyzem či dřevokaznými houbami a další. (Matovič, 1993)

3.1.2 Hustota

Za nejvhodnější kritérium pro posuzování fyzikálních vlastností dřeva lze považovat hustotu, a to i přesto, že je její určení oproti jiným materiálům poměrně obtížné vzhledem k hygroskopicitě, jelikož se samotná hustota dřeva mění v závislosti na vlhkosti, kdy s rostoucí vlhkostí se zvyšuje i hustota. (Horáček, 2008)

Hustota udává podíl hmotnosti dřeva a jeho objemu = objemové jednotky a vzhledem ke zmiňované závislosti na vlhkosti dřeva je nutné při výpočtu hustoty tuto vlhkost uvádět (například pomocí indexu). (akela)

Kvůli nehomogenitě a anizotropnímu charakteru dřeva je pro přesnější definici využíván pojem objemová hmotnost a platí následující matematický vztah:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3 \text{ nebo } \text{g/cm}^3]$$

kde m je hmotnost dřeva [kg, g] a V je objem dřeva v m^3 nebo cm^3

Nejčastěji využívané vlhkostní stavy pro charakteristiku hustoty dřeva jsou:

- a) suchý stav - 0 (= konvenční hustota = absolutně suchý stav s 0% vlhkostí dřeva)
- b) 12% vlhkost – $w=12\%$
- c) vlhkost - $w > 0 \%$ (= hustota při určité vlhkosti)

Hustota dřeva v absolutně suchém stavu se nejvíce využívá při teoretických výpočtech a porovnávání výsledků. Obecně je hustota dřeva široce využívána i v praxi, neboť právě hustota při 0% a 12% vlhkosti dřeva je považována za jeden z nejdůležitějších ukazatelů jeho kvality a rovněž je důležitým ukazatelem vhodnosti použití takového dřeva k různým účelům. Například dřevo s vyšší hustotou je tvrdší, pevnější, méně se opotřebovává. (Požgaj, 1997)

Hustotu dřeva při jeho specifické vlhkosti 12 % udávají platné normy z důvodu, že takové vlhkosti je dosaženo při dlouhodobém vystavování dřeva podmínkám běžně temperované místnosti, kde je nejčastěji používáno. Jedná se o místnost o teplotě 20°C a vlhkosti vzduchu 65 %. (Horáček, 2008)

Celkově se hodnoty hustoty dřeva pohybují v širokých intervalech v závislosti na druhu dřeviny. V případě tuzemských dřevin existuje rozdělení do třech skupin:

- a) dřeviny s nízkou hustotou ($\rho_{12} < 540 \text{ kg/m}^3$) - např. smrk, borovice, vrba
- b) dřeviny se střední hustotou ($\rho_{12} = 540\text{--}750 \text{ kg/m}^3$) - např. buk, dub, jasan
- c) dřeviny s vysokou hustotou ($\rho_{12} > 750 \text{ kg/m}^3$) - např. habr, moruše, akát

U tropických dřevin jsou intervaly pro hodnoty hustoty dřeva ještě širší, lze říci až extrémní. Za dřevinu s nejnižší hustotou, a tedy nejlehčí, je považována balsa (*Ochroma lagopus*) s $\rho_{12} = 130 \text{ kg/m}^3$ a naopak nejtěžší dřevinou světa s $\rho_{12} = 1360 \text{ kg/m}^3$ je guajak (*Lignum vitae*). Tropická dřevina meranti (*Shorea*) se pak pohybuje okolo $\rho_{12} = 630 \text{ kg/m}^3$ a merbau (*Intsia Bijuga*) $\rho_{12} = 800 \text{ kg/m}^3$. (Matovič, 1993) (Stará, 2014) (ARA)

Vzhledem k porézní struktuře dřeva se počítá také s hustotou dřevní substance (ρ_s), která udává poměr hmotnosti dřevní substance (m_s), neboli hmoty buněčných stěn zbavené submikroskopických dutin, lumenů a mezibuněčných prostor, a příslušného objemu (V_s).

Hustota dřevní substance je závislá na chemickém složení dřeva, zejména poměru ligninu, celulózy a hemicelulózy. Vzhledem k tomu, že u většiny dřevin jsou obsaženy tyto základní stavební jednotky v téměř stejných podílech, nemá samotný druh dřeviny příliš výrazný vliv na hustotu dřevní substance. Hodnota hustoty dřevní substance se tak udává jako hodnota průměrná a platná pro všechny typy dřevin, a to $\rho_s = 1\,530 \text{ kg/m}^3$.

Hustota dřevní substance je využívána při teoretických výpočtech u pórovitosti, nasákavosti (tedy maximální vlhkosti) nebo při technologických procesech impregnace dřeva. (Horáček, 2008)

3.2 Mechanické vlastnosti dřeva

Charakterizují a určují schopnost dřeva odolávat účinkům působení vnějších sil a lze je rozdělit na základní (pružnost, pevnost), odvozené (tvrdoost) a technologické (ohýbatelnost) mechanické vlastnosti. Veškeré mechanické vlastnosti dřeva jsou závislé na jeho hustotě, resp. vlhkosti a obecně jsou ovlivněny druhem dřeviny a směrem vláken, rozměry, ale i vadami a poškozením dřeva.

3.2.1 Pevnost

Pojem pevnost dřeva označuje jeho odolnost vůči trvalému poškození a stanovuje se jako skutečná pevnost, neboť teoretickou pevnost dřeva nelze spočítat. Vyjadřuje se napětím, při kterém dojde k porušení soudržnosti daného tělesa (σ_p). Tyto hodnoty o pevnosti dřeva se stanovují na základě zkoušek, při kterých je sledováno skutečné napětí ve chvíli porušení. Výjimku představuje pevnost dřeva v tlaku napříč vláken, kdy ke konečnému porušení nedochází, a proto je v tomto případě pevnost definována jako pevnost konvenční. (Mendelu)

Pevnost dřeva lze rozdělit do čtyř skupin podle

- a) stavu napjatosti - jednoosý, víceosý
- b) způsobu namáhání (zatížení) - tlak, tah, krut, smyk, ohyb
- c) časového průběhu při zatížení - statické, dynamické
- d) účinku zatížení - destruktivní, nedestruktivní (Gandelová, 2009)

Při stanovování pevnosti dřeva v tlaku je nutné brát ohled na orientaci vláken a směr působící síly. Dle toho rozeznáváme pevnost dřeva v tlaku

- a) ve směru vláken ($\sigma_{p\parallel}$)
- b) napříč vláken, kde se navíc rozlišuje
 - i. směr radiální (σ_p kolmý na R)
 - ii. směr tangenciální (σ_p kolmý na T)

Při působení tlaku ve směru vláken dochází k deformaci tělesa, což se projevuje zkrácením jeho délky. Celkový charakter deformace pak závisí na kvalitě a stavbě tělesa (dřeva), přičemž důležitými faktory jsou hustota a vlhkost dřeva. Například v případě vlhkého

dřeva, tedy s nízkou hustotou a pevností, dochází při tlakovém zatížení k otlacení vláken čelních ploch a vybočení stěn takto zatěžovaných těles, zatímco u dřeva suchého (vysoká hustota a pevnost) dochází k porušení dřeva ve formě smyku.

V případě působení tlaku napříč vláken ve většině případů nedochází k celkovému porušení dřeva, ale k jeho postupné deformaci zhušťováním dřevní struktury, proto se taková pevnost v tlaku určuje z meze úměrnosti, která je označována právě jako konvenční mez pevnosti. (Mendelu)

Nejvýznamnějšími faktory ovlivňující pevnost dřeva jsou vlhkost, hustota a teplota dřeva. Obecně lze říci, že čím blíže je hodnota vlhkosti k mezi hygroskopicity, tím nižší je pevnost dřeva. Významné rozdíly jsou patrné v případě porovnání vlhkosti $w = 0\%$ s hodnotou vlhkosti na mezi hygroskopicity při zatížení tlakem ve směru vláken, kdy mez pevnosti při vlhkosti $w = 0\%$ je 3,5krát větší než při vlhkosti na mezi hygroskopicity a celková deformace je pak až sedmkrát vyšší. Při zatížení tahem ve směru vláken jsou naopak rozdíly zanedbatelné. Lze tedy říci, že vliv vlhkosti na mechanické vlastnosti dřeva závisí na konkrétním způsobu jeho zatížení. (Gandelová, 2009)

V případě závislosti hustoty na mechanických vlastnostech dřeva je tento vztah poněkud složitější vzhledem k tomu, že pevnost dřeva není závislá pouze na dřevní substanci (resp. množství dřevní substance v objemové jednotce), ale i na celkové stavbě dřeva. Obecně je vliv hustoty významnější u suchého dřeva, s rostoucí vlhkostí tento vliv klesá. Hustota také ovlivňuje pevnost dřeva, která se zvyšuje s rostoucí hustotou, i když tento vztah nemusí být vždy významný. Jasnější určení vztahu mezi hustotou a pevností dřeva lze zjistit pomocí analýzy makroskopické stavby letokruhů. (Mendelu)

S rostoucí teplotou se snižuje pevnost dřeva v tlaku, ať už dočasně (do 70°C) nebo trvale (nad 100°C). Vlivem velmi vysokých teplot (nad 200°C) dochází k prudkému poklesu pevnosti a dřevo se stává křehkým. Při současném zvyšování teploty i vlhkosti dochází k ještě výraznějšímu snížení pevnosti, než když na dřevo působí tyto faktory jednotlivě. (Mendelu) (Matovič, 1993)

Zároveň se ale s rostoucí teplotou kladně mění jiné vlastnosti dřeva (např. tvarová a rozměrová stálost, odolnost vůči povětrnostním vlivům), proto se používá metoda termické modifikace, pomocí které můžeme změnit vlastnosti podle účelu použití.

4 Termická modifikace

Termická modifikace, neboli tepelná úprava, spočívá ve zvyšování teploty dřeva. Hlavním prvkem v procesu termické modifikace je vodní pára, díky které se dřevo zahřívá, a zároveň brání samovznícení. Při tomto procesu se nepoužívají žádné chemické látky. Termická modifikace se pohybuje zpravidla od 160°C do 215°C. Při takto vysoké teplotě se mění buněčná struktura dřeva, zároveň se mění mechanické a fyzikální vlastnosti. Úkolem této činnosti je změna vlastností dřeva na konkrétní účel použití. Požadovaných vlastností lze docílit pomocí různých vysoké teploty tepelné úpravy a doby upravování dřeva. Termická modifikace redukuje napětí uvnitř dřeva, snižuje vnitřní vlhkost dřeva, takže má termicky modifikované dřevo přibližně o 50 % nižší nasákavost než termicky nemodifikované, má za následek rozpad hemicelulózy, takže se snižuje kapacita absorpce a tím vytváří nehostinné podmínky pro růst hub. Kvůli této úpravě se mění i odstín dřeva, od světlé hnědé (160°C), po tmavě hnědou až načernalou (210°C). Pomocí této vlastnosti při termické modifikaci lze omezit, případně úplně zamezit, vytěžování tvrdých tropických dřevin kvůli jejich vzhledu, např. při výrobě nábytku. Změnou barvy lze docílit tmavého vzhledu dřeva, který je čím dál více žádaný. Zlepšují se především tyto vlastnosti: rozměrová a tvarová stálost, změna fyzikálních a mechanických vlastností, tepelná vodivost, zvýšená odolnost vůči abiotickým i biotickým činitelům a změna barvy. (LUNAWOOD, 2017) (Brittontimbers, 2012) (Mirako)

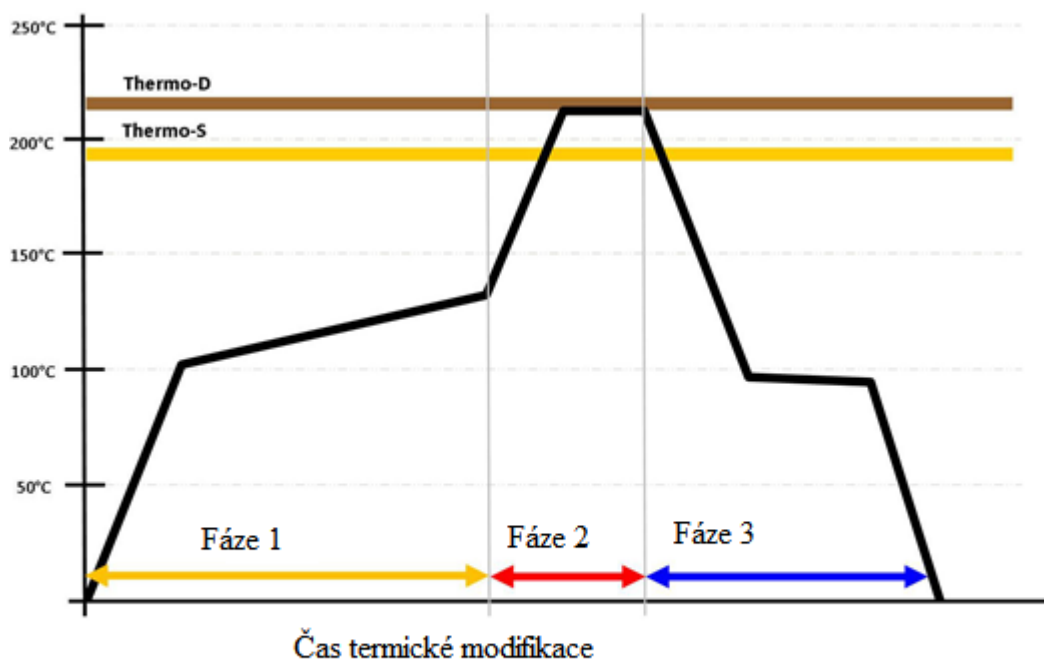
Proces termické modifikace probíhá podle těchto tří fází:

1. Zahřívání a sušení – V této fázi teplota, za pomoci horké páry, rapidně vzroste na 100 °C. Poté se teplota plynule zvyšuje na hodnotu 130 °C. Sušícím prostředkem je horký vzduch nebo horká pára. Během celé této fáze je dřevo vysušeno přibližně na 0% vlhkost.

2. Termická modifikace – Ve druhé fázi teplota vzroste na hodnotu 185 až 230 °C. Této teplotě je dřevo vystaveno po dobu 2 – 3 hodin. Výška teploty a doba trvání druhé fáze ovlivňuje požadavky na třídu produktu THERMOWOOD. Thermowood se rozděluje do dvou produktů, Thermo-S a Thermo-D. Thermo-S je upravováno na 190 °C, čímž se zvýší rozměrová a tvarová stálost. Používá se do interiéru, saun a na obklady stěn. Podle normy EN 113 se nachází ve třetím stupni odolnosti dřeva. Oproti tomu se Thermo-D upravuje na vyšší teplotu, konkrétně na 212 °C. Díky tak vysoké teplotě se zvýší odolnost dřeva, tvarová stabilita, ztmavne a získá větší odolnost vůči klimatickým podmínkám. Thermo-D se dostává na druhý stupeň odolnosti dřeva podle normy EN

113. Je možné jej použít na fasády, podbití či jako terasy k bazénům. (LUNAWOOD, 2018) (LUNAWOOD, 2017)

3. Chlazení a klimatizace – Ve třetí fázi je termicky modifikované dřevo postupně ochlazováno na teplotu 80 – 90 °C a vlhkost se stabilizuje, nakonec se ustálí v rozmezí 4 – 7%.



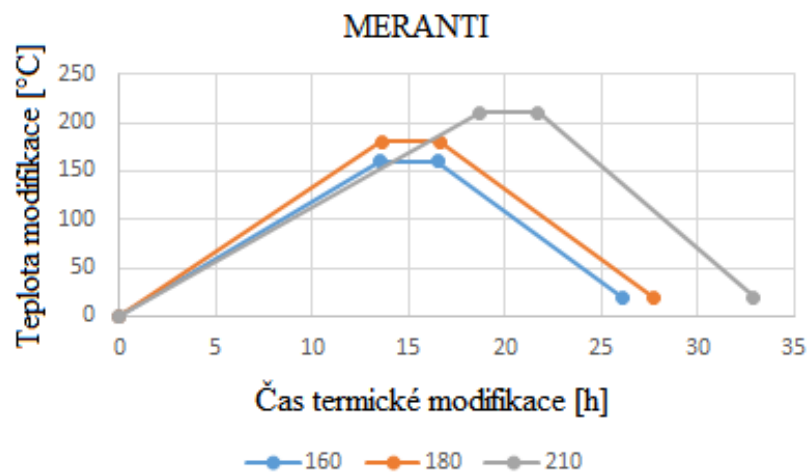
Obr. 1 Fáze termické modifikace (Jartek)

Tabulka 1 Třídy trvanlivosti ve styku se zemí různých druhů dřevin

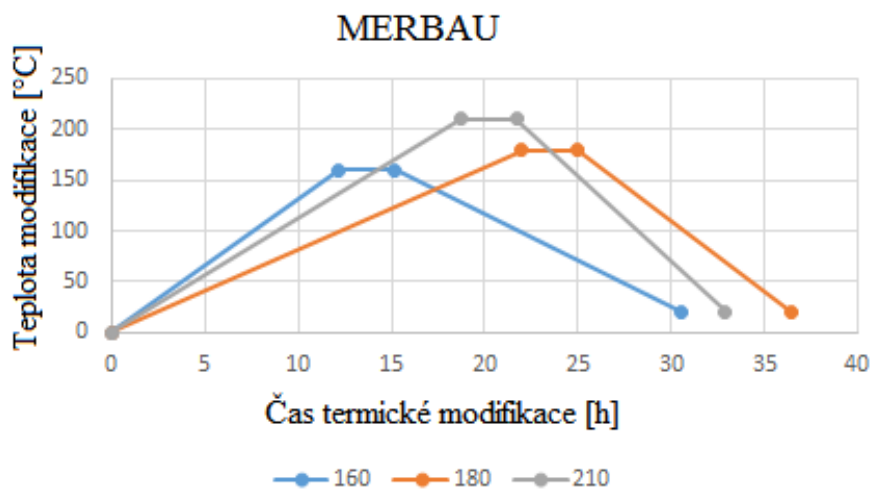
Třída	Dřevina				
1	Teak	Impregnované dřevo kvality A	Ipe	Padouk	Cumaru
2	Thermo-D	Dub	Akát	Iroko	Merbau
3	Thermo-S	Douglaska	Modřín	Ořešák	Borovice lesní
4	Jilm	Smrk ztepilý	Jedle	Borovice černá	Meranti
5	Bříza	Buk	Jasan	Olše	
Dřevo v třídě 2 je možné používat v exteriéru ve styku se zemí bez dalších úprav.					

4.1 Termická modifikace zkušebních vzorků

Termická modifikace dřeva se skládá ze tří základních fází, které jsou možné vidět na Obr. 2 a 3. Na ose x se nachází čas tepelné modifikace v hodinách, na ose y teploty ve stupních Celsia. Merbau se z technických důvodů nepodařilo termicky modifikovat na teplotu 210 °C. Proto se zde nenachází naměřené hodnoty a podle grafů lze předpokládat průběh změn vlastností. Tento průběh při teplotě 210°C je tedy pouze předpoklad a skutečný průběh se může lišit.



Obr. 2 Proces termické modifikace Meranti (*Shorea*)



Obr. 3 Proces termické modifikace Merbau (*Intsia Bijuga*)

Parametry termické modifikace zkušebních těles jsou uvedeny v Tabulkách 2 a 3. Konkrétně jde o teplotu, časy v jednotlivých fázích termické modifikace a celkový čas potřebný na termickou modifikaci.

Tabulka 2 Fáze a parametry termické modifikace Meranti (Shorea)

	Proces termické modifikace		
	160 °C	180 °C	210 °C
Zahřívání	13.5 h	13.6 h	18.7 h
Termická modifikace	3 h	3 h	3 h
Ochlazování	9.6 h	11.1 h	11.2 h
Celkový čas	26.1 h	27.7 h	32.9 h

Tabulka 3 Fáze a parametry termické modifikace Merbau (Intsia Bijuga)

	Proces termické modifikace		
	160 °C	180 °C	210 °C
Zahřívání	12,2 h	22 h	24 h
Termická modifikace	3 h	3 h	3 h
Ochlazování	15.3 h	11.4 h	11.4 h
Celkový čas	30.5 h	36.4 h	38.4 h

Pro výzkum byla použita tělesa z tropických dřevin Meranti a Merbau, proto je možné získat v další kapitole obecné informace o tropických dřevinách, vzhledu, vnitřní stavbě a jejím vlivu na mechanické i fyzikální vlastnosti těchto dvou dřevin.

5 Tropické dřeviny

Jako tropické či exotické jsou obecně označovány dřeviny z lesů tropického pásma, tedy z oblastí mezi rovníkem a obratníky (přibližně 23° severní, resp. jižní šířky) a z převážné většiny se jedná o dřevo listnatých stromů. Do Evropy nejčastěji dovážené tropické dřeviny pocházejí z oblastí rovníkové Afriky, jihovýchodní Asie a Latinské Ameriky.

Tropické dřeviny mají své charakteristické a specifické vlastnosti, díky kterým jsou, a i v minulosti byly, velmi oblíbené. Používají se do interiérů i exteriérů, jsou vhodné jak pro stavebně-truhlářské výrobky (např. okna, terasy, schodiště), tak k výrobě nábytku či hudebních nástrojů a uměleckých předmětů.

Mezi velké výhody tropických dřevin určitě patří jejich vysoká tvrdost a odolnost vůči oděru, ovšem za jejich hlavní výhodu lze jistě považovat vysokou trvanlivost a odolnost vůči biologickým degradacím díky obsahu velkého množství extraktivních látek. Právě extraktivní látky obsažené ve dřevě nejvíce ovlivňují jeho fyzikální a mechanické vlastnosti, a to jak pozitivně (například již zmiňovaná trvanlivost), tak i negativně, neboť jsou zodpovědné za intenzivní změny barvy tropického dřeva. Právě změny barvy lze zařadit mezi významné nevýhody tropických dřevin, kde na jedné straně jsou vysoce ceněné pro své výrazné, nevšední, exotické zbarvení, ale zároveň jsou velmi náchylné na změny v barvě, tj. nevyrovnaná barevnost, barevné skvrny apod. Díky působení vnějších klimatických vlivů jako UV záření či povětrnostní podmínky se velmi často stává, že tropické dřevo v exteriéru zešediví až zčerná, může se na jeho povrchu objevit i slabá plíseň. Jedná se ovšem pouze o estetické poškození, nikoliv o poškození funkční a částečně se tomuto procesu dá zabránit vhodnou péčí a úpravou, zejména pravidelnými nátěry speciálně určených olejů či laků. Jako další nevýhody tropického dřeva jsou uváděny zvýšená prašnost při zpracování, zejména tedy broušení dřeva, relativně vysoká cena v porovnání s tuzemskými dřevinami a v neposlední řadě častěji diskutované ekologické aspekty a udržitelný rozvoj. (Pánek, 2015)

5.1 Merbau (*Intsia Bijuga*)

Jiné obchodní názvy: hintzy, mirabow, kalabau, ipil, gonuoc, makamong, kwila, lum-paw

Tato tropická dřevina z rodu *Intsia* pochází z jihovýchodní Asie (Malajsie, Indonésie, Barma, Vietnam), kde se vyskytuje převážně ve stálezelených, ale i suchých tropických lesích, v blízkosti pobřeží s nadmořskou výškou do 600 m n.m. Průměrná roční teplota v lokalitách výskytu Merbau se pohybuje okolo 26°C, nízké teploty na Merbau nepůsobí příznivě. (Orwa, et al., 2009)

5.1.1 Makroskopická stavba

Merbau se řadí mezi jádrová dřeva s hnědošedou až tmavě červenohnědou barvou jádra. Běl je od jádra velmi dobře odlišena, má světle žlutou barvu a je 5-8 cm široká. Textura dřeva je hrubší, rovnovláknitá, někdy lehce pruhovaná vlivem točitosti vláken. Povrch dřeva je mírně mastný se slabým leskem. Cévy lze pozorovat jako malé drobné rýhy na příčných řezech, které jsou místy vyplněné olejnatou pryskyřicí. Na radiálním řezu jsou viditelné dřevné paprsky v podobě zrcátek, na řezu tangenciálním mají podobu krátkých svislých pásků. (Šlezingerová, 2013)

5.1.2 Mikroskopická stavba

Pro tropickou dřevinu Merbau je charakteristická roztroušeně pórovitá stavba s málo četnými, poměrně širokými cévami vyskytujícími se jednotlivě nebo v krátkých radiálních skupinách po dvou až třech. Vyplněné jsou světle žlutými až tmavě červenohnědými, ve vodě rozpustnými, látkami. Dřevné paprsky jsou homogenní, jedno až čtyřvrstevné a v jejich parenchymatických buňkách se mohou vyskytovat anorganické krystaly. Základním pletivem jsou tlustostěnná libriformní vlákna s obvykle přímým průběhem, točitost je méně častá. Axiální parenchym je u dřeva Merbau paratracheální vazicentrický křídlovitý až splývavý. (Šlezingerová, 2013)

5.1.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti

Mezi charakteristické vlastnosti Merbau patří jeho tvrdost, dle norem se řadí mezi velmi tvrdá dřeva, s vysokou hustotou, která se při vlhkosti ρ_{12} pohybuje v rozmezí 750 - 850 kg/m³. Dřevo Merbau nepodléhá změnám vlhkosti, hodnoty sesýchání jsou velmi nízké. Mez pevnosti v tlaku podél vláken se pohybuje mezi 58 - 85 MPa. Obecně je Merbau velmi pevné, pružné a ohebné, bez sklonu k tvorbě trhlin. Rovněž je velmi trvanlivé a odolné proti dřevokazným houbám, hmyzu i povětrnostním vlivům.

Využívá se jako stavební a konstrukční materiál pro interiéry i exteriéry, stavebně-truhlářské výrobky, vodní a lodní stavitelství, železniční pražce. Velmi populární je Merbau u výroby zahradního nábytku, venkovních teras a obložení bazénů. (Šlezingerová, 2013)

5.2 Meranti (*Shorea*)

Jiné obchodní názvy: lauan, seraya, bataan, araka, pata, saya (a mnohé další vzhledem k rozšíření druhů rodu *Shorea*)

Tato tropická dřevina z rodu *Shorea* pochází z jihovýchodní Asie (Borneo, Thajsko, Barma, Kambodža, Filipíny), kde se vyskytuje ve vlhkých, stálezelených tropických lesech jak v nižších, tak i vyšších polohách. (Šlezingerová, 2013)

5.2.1 Makroskopická stavba

Meranti patří mezi jádrová dřeva s barvou jádra od hnědorůžové až po tmavě červenou v závislosti na lokalitě výskytu. Barva jádra se na světle mění jak do světlejších odstínů, tak i do ještě tmavších. Běl Meranti je poměrně široká, 6 - 10 cm, a má barvu šedou až šedorůžovou s tím, že tmavne do nahnědlých odstínů. Přírůstové zóny jsou nezřetelné a nejasné. Cévy středně velké, lze je pozorovat na podélných řezech jako malé rýhy. Dřevní paprsky na radiálním řezu jsou zřetelná tmavá zrcátka. V tangenciálních svazcích v podélném parenchymu se nacházejí pryskyřičné kanálky, díky kterým se vytváří světlé proužky na příčných řezech a jemné žilky na řezech podélných. Textura Meranti je středně hrubá, rovnoláknitá, vlivem střídavé točitosti vláken je pruhovaná, resp. žíhaná. Povrch Meranti je lesklý, u čerstvého dřeva je velmi patrná jeho charakteristická aromatická vůně. (Šlezingerová, 2013)

5.2.2 Mikroskopická stavba

Mikroskopická stavba Meranti je roztroušeně pórovitá, středně široké až široké cévy nejsou příliš četné a nalézají se v párech či malých radiálních skupinách. Často jsou vyplněné thylami. Jedno až šestivrstevné dřeňové paprsky jsou heterogenní, relativně vysoké a nepravidelně uspořádané. Parenchymatické buňky jsou hustě vyplněné jádrovými látkami hnědočervené barvy. Axiální parenchym s, často velmi širokými, pryskyřičnými kanálky s bílou pryskyřicí. Parenchymatické buňky axiálního parenchymu často obsahují anorganické krystaly. Základní pletivo dřeva Meranti je tvořeno libriformními vlákny, jenž mají přímý, rovný průběh nebo sledují točivost kmene. (Šlezingerová, 2013)

5.2.3 Fyzikální a mechanické vlastnosti

Meranti se řadí mezi měkká až středně tvrdá dřeva. Se svojí hustotou $\rho_{12} = 500 - 700 \text{ kg/m}^3$ je řazeno mezi lehká až středně těžká dřeva. Absorbuje vlhkost či vysychá v závislosti na klimatických podmínkách, proces vysychání je poměrně rychlý a bezproblémový. Změny teplot a vlhkosti způsobují, že u dřeva často dochází k drobným změnám v jeho tvaru, barvě či k tvorbě malých prasklin, ovšem vliv na mechanické vlastnosti, především pevnost, není významný. Hodnoty pevnosti v tlaku podél vláken dosahují průměrných hodnot (okolo 50 MPa). Dřevo Meranti je pružné a velmi odolné vůči mechanickému poškození. Po vysušení alespoň na 12% vlhkost je trvanlivé a ve srovnání s čerstvým, vlhkým dřevem je odolné vůči dřevokazným houbám a hmyzu a povětrnostním vlivům.

Dřevo Meranti má široké využití při stavbě středně namáhaných konstrukcí, a to v interiéru i exteriéru. Je oblíbené při výrobě stavebně-truhlářských prvků jako schody, podlahy či parkety. Používá se také na výrobu dých, překližek a nejrůznějších obalů. Využití nachází i při stavbách lodí a člunů a při výrobě hudebních nástrojů, například pián. (Šlezingerová, 2013)

Hodnoty rázové houževnatosti dřevin Meranti i Merbau jsou dopočítávány a vyjadřovány jak u termicky nemodifikovaných, tak termicky modifikovaných vzorků v následující kapitole.

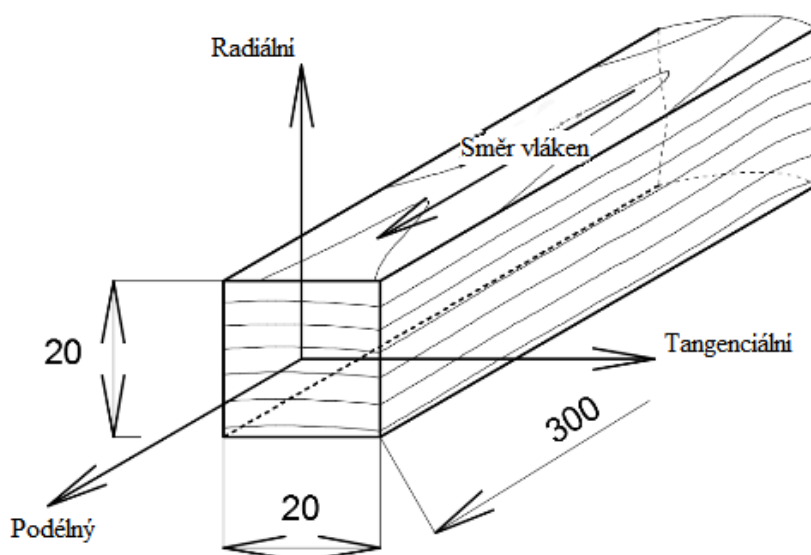
Hodnoty nasákavosti u , výše zmiňovaných, testovaných vzorků jsou vyjádřeny v kapitole 7.

6 Rázová houževnatost

Na začátku dvacátého století (1906) byly provedeny studie při výrobě dřevěných letadel. Rázová houževnatost byla jedna z prvních dynamických zkoušek a během testování houževnatosti se měnila hmotnost kladiva. Nakonec bylo vybráno a nadále doporučováno kladivo o hmotnosti necelých 23 kg. Nejlepších hodnot dosahovali Ořechovec, Bříza a Jilm. RH je vlastnost dřeva, díky které je schopno pohltit práci vykonanou rázovým zatížením, tzn. krátkodobě působící silou. Tato síla je vykonávána většinou pomocí přerážecích kladiv, např. Charpyho kladivem, které bylo použito i v tomto výzkumu. Pomocí stupnice vyjadřují velikost energie potřebné k přeražení vzorku dřeva předem definovaných rozměrů. Jak rychlost namáhání roste, vzorky se stávají křehčími, to má za následek přeražení vzorků již při malém průhybu. (Zejda, Tippner, Sebera, Koňasová, & Dániel, 2015) (Mendelu) (ÚFMI)

6.1 Materiál

Na výzkum rázové houževnatosti byla použita zkušební tělesa z tropických dřevin Meranti (*Shorea*) a Merbau (*Intsia Bijuga*). Tyto vzorky byly následně termicky modifikovány v tepelné komoře od společnosti Katres s.r.o., se sídlem v Jihlavě. Pro tepelnou modifikaci byly použity teploty 160°C, 180°C a 210°C. Naměřené a vyhodnocené výsledky byly porovnané s výsledky referenčních, termicky neupravených, zkušebních těles, tedy 20°C. Každý soubor zkušebních těles obsahoval 12 zkušebních vzorků o rozměrech 300mm na délku, 20mm na šířku a 20mm na tloušťku. Celkem měl testovaný soubor 96 zkušebních těles. Směry a rozměry zkušebních těles jsou patrné na Obr. 4.



Obr. 4 Směry řezů a rozměry zkušebních těles

6.2 Metodika

Na začátku tohoto pokusu bylo zapotřebí vypočítat dané hodnoty termicky nemodifikovaných těles dřevin Meranti a Merbau. Následně se další ze zkušebních vzorků termicky modifikovaly. Detailní popis potřebného času a teploty je v kapitole 4.1. Poté se hodnoty vypočítávaly i pro termicky modifikované vzorky při teplotách 160°C, 180°C a 210°C. Tyto výpočty jsou v následujícím textu.

Hustota dřeva byla počítána před a po testování podle normy ISO 13061-2 a vzorce (1),

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w * b_w * l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (1)$$

kde ρ_w je hustota vzorku při vlhkosti w [kg/m³]; m_w je hmotnost vzorku při obsahu vlhkosti w [kg]; a_w , b_w , a l_w jsou rozměry vzorku při obsahu vlhkosti w [m]; a V_w je objem vzorku při obsahu vlhkosti w [m³].

Obsah vlhkosti vzorků byl změřen a ověřen před a po testování. Toto měření bylo také na základě normy ISO 13061-1 a vzorce (2),

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (2)$$

kde w je obsah vlhkosti vzorku [%], m_w je hmotnost vzorku při obsahu vlhkosti w [kg], a m_0 je hmotnost vysušeného vzorku [kg]. Sušení vzorků na 0% vlhkosti bylo také na základě normy ISO 13061-1.

Na převedení z ρ_w na ρ_{12} byl použit vzorec uvedený též v normě ISO 13061-2, platí pro vlhkost od 7% do 17%. Podle vzorce (3),

$$\rho_{12} = \rho_w \left[1 - \frac{(1 - K) \cdot (w - 12)}{100} \right] \quad (3)$$

kde K je koeficient objemového sesychání při změně objemu o 1%. Pro většinu měření je možné dosadit za $K = 0.85 \cdot 10^{-3}$, ρ_w se udává v kg/m³, ρ_{12} je hustota vzorku při vlhkosti 12 %, také v kg/m³.

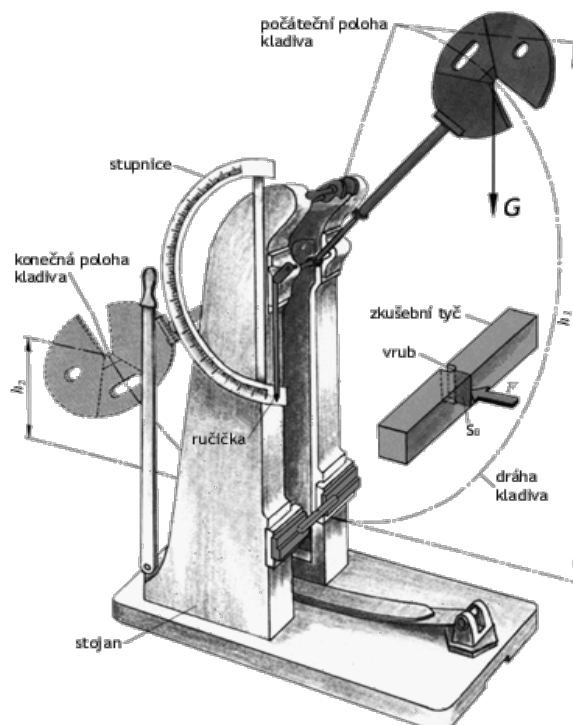
Pro určení meze úměrnosti při třibodovém dynamickém ohybu probíhal podle normy ČSN EN 310. V prvním kroku byla určena mez úměrnosti z grafu závislosti mezi napětím a

deformací. Mez úměrnosti je hranice nacházející se mezi přímkou a křivkou závislosti v plastické oblasti. Ohyb byl vypočítáván za pomoci normy ČSN EN 310 a vzorce (4),

$$\Delta y = \frac{1}{4} \frac{\Delta F \cdot l_0^3}{b \cdot h^3 \cdot E} \quad (4)$$

kde Δy je průhyb testovaného vzorku při čistém ohybu, stejně jako rozdíl mezi ohybovými hodnotami odpovídající maximálním a minimálním limitům [mm], E je modul pružnosti [MPa], ΔF je rozdíl mezi silami při minimálním a maximálním zatížení [N], l_0 je vzdálenost mezi supporty [mm], b a h jsou rozměry šířky a výšky [mm].

Pro určení rázové houževnatosti bylo použito Charpyho kladivo s hmotností přerážecího kladiva 20 kg. Princip testování rázové houževnatosti je možné vidět na Obr. 5, kde padá kladivo z počáteční výšky h_1 . Při pohybu dolů, kdy kladivo naráží na testovaný vzorek dřeva, se dostává do výšky h_0 . V konečné poloze h_2 se kladivo zastaví, ručička ukáže na stupnici číselnou hodnotu, která vyjadřuje energii potřebnou k přeražení vzorků. Energie, která byla použita na přeražení vzorků, byla určena z rozdílů energií před a po přeražení vzorku. Směr nárazu kladiva na testované vzorky byl na tangenciální plochu. Vzdálenost supportů Charpyho kladiva byla 240 mm.



Obr. 5 Charpyho kladivo (Strojaři)

Rázová houževnatost byla vypočítána za pomoci normy ISO 13061-10 a vzorce (5),

$$A_w = \frac{Q}{b * h} \quad (5)$$

kde A_w je rázová houževnatost dřeva [J/cm^2], Q je energie potřebná k přeražení testovaných vzorků [J], b je šířka vzorku [cm] a h je výška (tloušťka) vzorku [cm].

Hodnoty rázové houževnatosti byly převedeny na vlhkost 12% v souladu s normou ISO 13061-10 a vzorce (6),

$$A_{12} = A_w [1 + \alpha(w - 12)] \quad (6)$$

kde A_w je pevnost v ohybu dřeva o známé vlhkosti během testování [MPa], A_{12} je pevnost v ohybu dřeva o vlhkosti 12% [MPa], w je vlhkost vzorků během testování [%] a α je vlhkostní koeficient. Jeho hodnota je 0.04 a používá se pro všechny druhy dřevin.

6.3 Vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita vice-faktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich dvou, tří nebo čtyř vzájemných kombinací. Jednotlivé faktory analýzy byla teplota termické modifikace (20°C, 160°C, 180°C a 210°C) a druh dřeviny (Meranti, Merbau). K tomuto ohodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemnou kombinací byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$ a Duncanovy testy mnohonásobného porovnání. F-test na základě hladiny významnosti „P“ stanovil, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Podle hodnoty „P“ lze testovaný faktor ohodnotit takto:

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

V Tabulce 4 jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřené rázové houževnatosti a hustoty pro jednotlivé stupně termické modifikace. Stejně tak je uveden variační koeficient.

Tabulka 4 Základní statistická analýza rázové houževnatosti a hustoty

Druh dřeviny	TM (°C)	RH (J/cm ²)	Hustota (Kg/m ³)
<i>Meranti</i>	20	22,6 (16,3)	547,6 (19,9)
<i>Meranti</i>	160	14,8 (18,1)	410,6 (3,2)
<i>Meranti</i>	180	16,0 (16,5)	509,2 (24,3)
<i>Meranti</i>	210	11,0 (7,4)	536, 4 (23,9)
<i>Merbau</i>	20	26,0 (19,8)	921,5 (2,5)
<i>Merbau</i>	160	32,8 (15,7)	794,3 (3,1)
<i>Merbau</i>	180	15,3 (13,0)	729,4 (4,6)
<i>Merbau</i>	210	-	-

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty rozdílů v %.

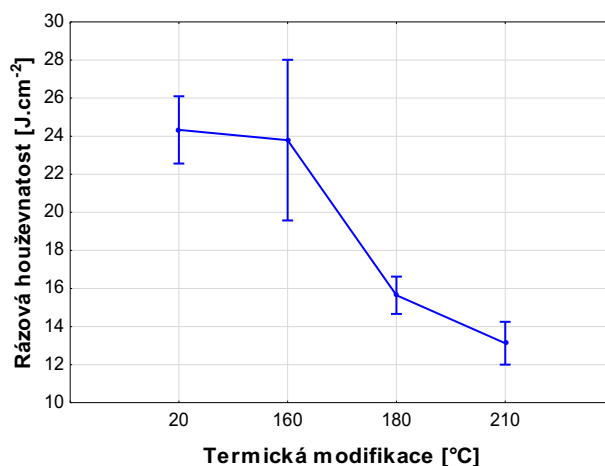
Na základě hodnot hladiny významnosti „P“ lze konstatovat, že jsou všechny faktory z Tabulky 5 statisticky významné.

Tabulka 5 Vliv prvků a jejich vzájemné působení na rázovou houževnatost

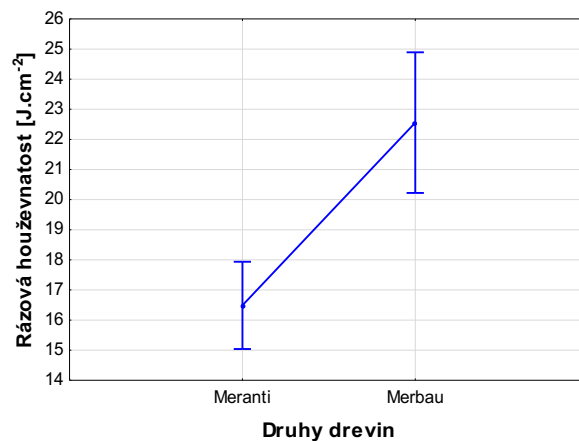
Vyhodnocený prvek	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Variace	Fisherův F-test	Hladina významnosti P
Abs. člen	37345,07	1	37345,07	3172,356	***
TM	2474,70	3	824,90	70,073	***
DV	982,24	1	982,24	83,439	***
TM*DV	1189,30	3	396,43	33,676	***
Chyba	1106,57	94	11,77		

NS – statisticky nevýznamný, *** - statisticky významný. Přijetí statistické významnosti bylo při $P < 0.05$

Z Obr. 6 lze vyvodit, že rozdíl rázové houževnatosti mezi termicky nemodifikovaným (20°C) a termicky modifikovaným (160°C) zkušební souborem není statisticky významný. Naopak u termicky modifikovaného (160°C) a 180°C je statisticky velmi významný. Mezi termicky modifikovanými soubory 180°C a 210°C je statisticky významný rozdíl.



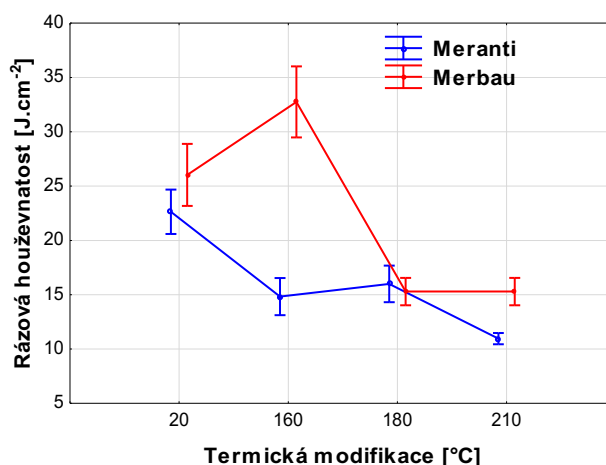
Obr. 6 Vliv teploty termické modifikace na hodnoty rázové houževnatosti.



Obr. 7 Vliv druhu dřeviny na hodnoty rázové houževnatosti.

Podle průběhu grafu na Obr. 7 lze říci, že je statisticky velmi významný rozdíl v rázové houževnatosti mezi jednotlivými druhy zkušebních dřevin.

Z Obr. 8 je zřejmé, že rázová houževnatost mezi termicky nemodifikovanými (20°C) a termicky modifikovanými (160°C) tělesy je u testovaných dřevin zcela odlišná. Zatímco u Meranti je významný pokles, u Merbau významný vzestup. Nejvýraznější je rozdíl mezi termicky modifikovanými tělesy 160°C a 180°C, kde RH u Merbau velmi statisticky významný, u Meranti je změna hodnoty statisticky nevýznamný. Rozdíl mezi teplotami 180°C a 210°C lze považovat za statisticky významné.



Obr. 8 Synergický efekt tepelné modifikace a druhu dřeviny na rázovou houževnatost

Podle Tabulky 6 lze vyjádřit následující interakci druhů dřevin a teploty termické modifikace u kterých se neprokázal statisticky významný rozdíl: mezi Meranti (160°C) a oběma dřevinami při teplotě 180°C, u obou dřevin termicky modifikovaných při teplotě 180°C.

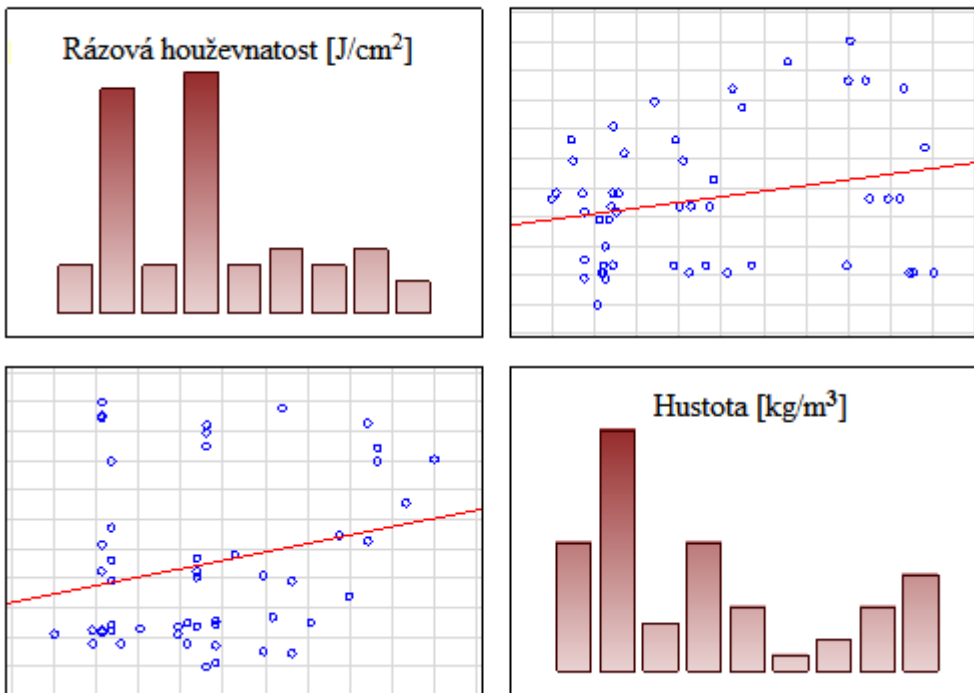
Tabulka 6 Srovnání efektu druhu dřevin na rázovou houževnatost při použití Duncanova testu

Č.	TM (°C)	Druh dřeviny	(1) 22.63	(2) 26.03	(3) 14.83	(4) 32.75	(5) 16.00	(6) 15.29	(7) 10.96	(8) 15.29
1	20	Meranti		0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-
2	20	Merbau	0,015		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-
3	160	Meranti	0,000	0,000		0,000	0,444	0,755	0,006	-
4	160	Merbau	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	-
5	180	Meranti	0,000	0,000	0,444	0,000		0,605	0,001	-
6	180	Merbau	0,000	0,000	0,755	0,000	0,605		0,004	-
7	210	Meranti	0,000	0,000	0,006	0,000	0,001	0,004		-
8	210	Merbau	-	-	-	-	-	-	-	

Tabulka 7 Spearmanova korelace pro hodnoty rázové houževnatosti a hustoty.

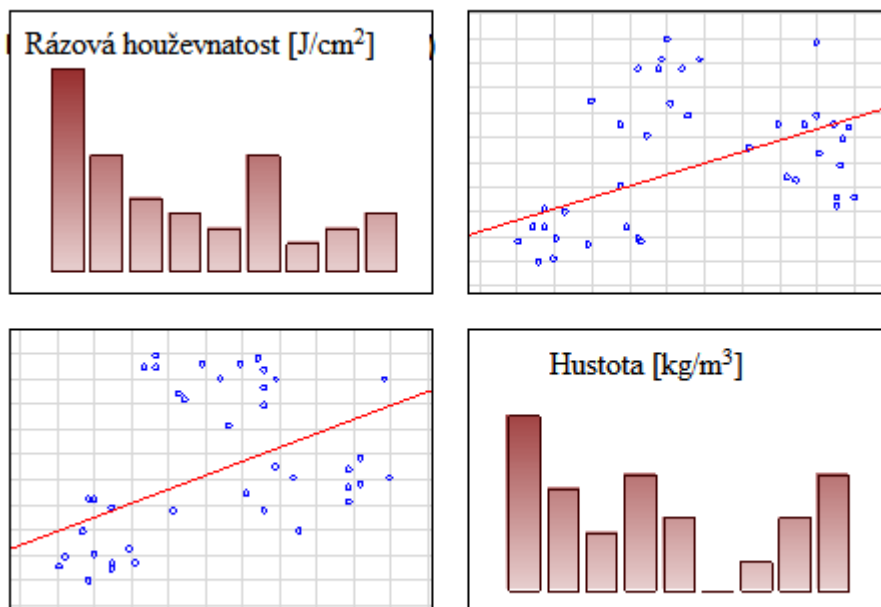
<i>Meranti</i>		<i>Merbau</i>		
Variabilita	RH (J/cm ²)	Hustota (kg/m ³)	RH (J/cm ²)	Hustota (kg/m ³)
RH (J/cm ²)		19,32		62,41
Hustota (kg/m ³)	19,32		62,41	

Meranti



Obr. 9 Graf korelace rázové houževnatosti a hustoty Meranti

Merbau



Obr. 10 Graf korelace rázové houževnatosti a hustoty Merbau

7 Nasákavost

Je schopnost dřeva v důsledku jeho pórovité stavby přijímat vodu. Množství volné vody je závislé především na objemu pórů ve dřevě. Nasákavost jádra dřeva je menší než bělí a zmenšuje se s rostoucí hustotou dřeva. Rychlost nasákavosti lze ovlivnit změnou teploty. Čím větší je teplota, tím rychleji dřevo přijímá vodu. (Zejda, Tippner, Sebera, Koňasová, & Dániel, 2015)

Sledovanými charakteristikami u výzkumu nasákavosti dřeva byly:

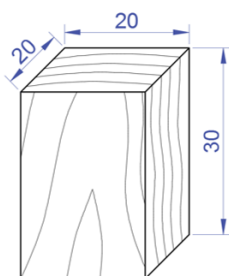
- změna rozměrů v jednotlivých směrech dřeva (podélný, radiální a tangenciální)
- změna objemu
- změna hmotnosti
- změna hustoty od absolutně suchého stavu až do uplynutí 96 hodin ve vodě
- změna vlhkosti od absolutně suchého stavu až do uplynutí 96 hodin ve vodě

7.1 Materiál

Na výzkum byla použita zkušební tělesa z tropických dřevin, konkrétně Meranti (Shorea) a Merbau (*Intsia Bijuga*). Výzkum tvořily dva základní soubory zkušebních těles:

- termicky nemodifikovaná zkušební tělesa 20°C
- termicky modifikovaná zkušební tělesa na teploty 160°C, 180°C a 210°C.

Ve výzkumu se sledoval účinek termické modifikace na rozměrové a objemové bobtnání, nasákavost a hustotu dřeva během ponoření těles do vody. Pro hodnocení bobtnání byla použita zkušební tělesa o rozměrech 30 mm na délku, 20 mm na šířku a 20 mm na tloušťku (Obr. 11).



Obr. 11 Rozměry zkušebních těles pro vyhodnocení nasákavosti

7.2 Metodika

Ukazatelem nasákavosti byly hodnoty vybraných charakteristik naměřených na zkušebních tělesech, které byly termicky modifikovány. Detailní popis potřebného času a teploty termické modifikace je v kapitole 4.1. Výsledky naměřené na termicky nemodifikovaných tělesech se porovnávaly s výsledky termicky modifikovaných těles.

Změny jednotlivých sledovaných charakteristik byly zjišťovány postupným měřením v určitých časových intervalech. Přesněji to bylo po 30s, 1.5min, 3min, 6min, 15min, 0.5h, 1h, 1.5h, 3h, 6h, 12h, 24h, 48h, 96h.

Hustota měřených intervalů je na začátku měření vyšší z důvodu rychlejší reakce materiálu na změny vlhkosti okolí.

7.3 Výpočet změn sledovaných charakteristik

Měření celkového a částečného bobtnání v čase dřeva bylo prováděno v souladu s normou ČSN 49 0104. Pro určení hodnot bobtnání dřeva byla tělesa ponořena do věder naplněných vodou, zatížena a takto ponechána po dobu jednotlivých intervalů.

$$\beta_t = \frac{\beta_o - \beta_{wt}}{\beta_o} [\%]$$

kde β_t udává procentuální přírůstky jednotlivých směrů v závislosti na sledovaném čase, β_o je rozměr tělesa v absolutně suchém stavu a β_{wt} udává rozměry tělesa v jednotlivých směrech po uplynutí jednotlivých intervalů.

Ve stanovených časových intervalech byla zaznamenávána hmotnost pomocí laboratorní váhy Kern PCB 2500-2 a rozměry v podélném, radiálním a tangenciálním směru pomocí posuvného měřítka Kinex Labo Iconic. Z naměřených údajů byly následně, podle vzorce (3), vypočítány změny měřených hodnot v zadaných časových intervalech.

Pro úplnost hodnot potřebných k výpočtu bobtnání v čase i celkovému bobtnání byly použity výsledky měření rozměrů hustoty při vlhkosti 0%.

$$P_1 = Ch_{t_2} - Ch_{t_1} \quad (3)$$

$$P_2 = Ch_{t_3} - Ch_{t_1}$$

$$P_3 = Ch_{t_4} - Ch_{t_1}$$

kde $P_{(1, 2, 3, \dots, n)}$ je hodnota sledované charakteristiky v čase t_1, t_2, t_3 ; $Ch_{t_{(1, 2, 3, \dots, n)}}$ je hodnota sledované charakteristiky v čase t_1, t_2, t_3 , a Ch_{t_1} je hodnota sledované charakteristiky na začátku měření, tedy v čase t_1 .

Měření změn probíhalo po dobu 96 hodin – průběh změn byl měřen po předem stanovených intervalech. Tímto způsobem byly naměřeny následující změny charakteristik:

- Změna hmotnosti [g] po 96 hodinách od ponoření dřeva do vody.
- Změna objemu [mm³] po 96 hodinách od ponoření dřeva do vody.
- Změna hustoty [kg/m³] po 96 hodinách od ponoření dřeva do vody.
- Změna v podélném směru [mm] po 96 hodinách od ponoření dřeva do vody.
- Změna v radiálním směru [mm] po 96 hodinách od ponoření dřeva do vody.
- Změna v tangenciálním směru [mm] po 96 hodinách od ponoření dřeva do vody.

Hustota dřeva byla vypočítána po vysušení vzorků a po uplynutí 96 hodin ve vodě. Výpočet probíhal podle normy ISO 13061-2 a vzorce (4),

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w * b_w * l_w} = \frac{m_w}{V_w} \quad (4)$$

kde ρ_w je hustota vzorku při vlhkosti w [kg/m³]; m_w je hmotnost vzorku při obsahu vlhkosti w [kg]; $a_w, b_w,$ a l_w jsou rozměry vzorku při obsahu vlhkosti w [m]; a V_w je objem vzorku při obsahu vlhkosti w [m³].

Obsah vlhkosti vzorků byl změřen a ověřen před a po testování. Toto měření bylo také na základě normy ISO 13061-1 a vzorce (5),

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (5)$$

kde w je obsah vlhkosti vzorku [%], m_w je hmotnost vzorku při obsahu vlhkosti w [kg], a m_0 je hmotnost vysušeného vzorku [kg].

Sušení vzorků na 0% vlhkosti bylo také na základě normy ISO 13061-1.

7.4 Vyhodnocení

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita vice-faktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich dvou, tří nebo čtyř vzájemných kombinací. Jednotlivé faktory analýzy byla teplota termické modifikace (20°C, 160°C, 180°C a 210°C) a druh dřeviny (Meranti, Merbau). K tomuto ohodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemnou kombinací byl použit Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$, a Duncanovy testy mnohonásobného porovnání. Vyhodnocení F-testu probíhalo se stejnými podmínkami jako u vyhodnocování rázové houževnatosti. (Gaff, et al., 2009)

V Tabulce 8 jsou uvedeny průměrné hodnoty změn sledovaných charakteristik v intervalu od absolutně suchého stavu až po ukončení experimentu, tzn. po 96h.

Tabulka 8 Průměrné změny hodnot sledovaných charakteristik po dobu 96 hodin

Druh dřeviny	TM [°C]	Změna hmotnosti [g]	Změna objemu [mm ³]	Změna hustoty [kg/m ³]	Změna v radiálním směru [mm]	Změna v tangenciálním směru [mm]	Změna v podélném směru [mm]	Hustota [Kg/m ³]
Meranti	20	3,3 (8,5)	976,2 (9,5)	215,1 (15,0)	0,7 (25,1)	1,0 (19,7)	0,1 (16,3)	614
Meranti	160	3,1 (9,3)	922,9 (14,0)	205,5 (18,1)	0,6 (10,3)	1,0 (15,6)	0,1 (14,9)	584
Meranti	180	2,5 (10,1)	801,0 (9,7)	166,5 (13,8)	0,5 (17,7)	0,9 (13,4)	0,0 (16,0)	598
Meranti	210	1,9 (8,8)	478,2 (21,0)	141,6 (8,8)	0,3 (25,3)	0,6 (16,6)	0,1 (13,1)	560
Merbau	20	2,4 (12,6)	744,7 (11,7)	145,6 (15,2)	0,6 (10,4)	0,7 (18,0)	0,1 (11,8)	847
Merbau	160	2,6 (7,5)	749,7 (17,1)	161,1 (8,3)	0,5 (17,5)	0,9 (13,3)	0,1 (17,6)	824
Merbau	180	2,4 (13,6)	749,7 (17,1)	158,5 (11,6)	0,3 (16,8)	0,8 (21,0)	0,1 (19,6)	828
Merbau	210	-	-	-	-	-	-	-

Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %.

7.4.1 Statistické vyhodnocení závislosti termické modifikace na změny hodnot sledovaných charakteristik.

Na základě dat v Tabulce 9 a grafu v Obr.12 lze říci, že nejvyšší statistické významnosti nabývá rozdíl termické modifikace u Meranti mezi 160°C, 180°C a 210°C. Mezi termicky nemodifikovanými (20°C) a termicky modifikovanými (160°C) tělesy je u obou druhů dřevin statisticky významný rozdíl. U Meranti došlo ke snížení hmotnosti, u Merbau ke zvýšení. Celkový průběh hmotností u Merbau není tak výrazný jako u Meranti. Dá se předpokládat, že bude hmotnost při 210°C dále klesat.

Tabulka 9 Více-faktorová analýza rozptylu hodnotící změnu hmotnosti [g] po dobu 96 hodin

Vyhodnocující prvek	Součet čtverců	Počet stupňů volnosti	Variace	Fisherův F-test	Ukazatel hladiny významnosti <i>p</i>
Abs. člen	526,5432	1	526,5432	7156,983	***
DV	1,1092	1	1,1092	15,077	***
TM	6,6367	3	2,2122	30,069	***
DV x TM	4,5382	3	1,5127	20,562	***
Chyba	5,2971	72	0,0736		

NS – statisticky nevýznamný, *** - statisticky významný. Přijetí statistické významnosti bylo při $P < 0.05$.

Ohledně změn objemu není druh dřeviny statisticky významný. Statisticky velmi významný je pouze pokles objemu mezi 180°C a 210°C termické modifikace Meranti. Jak je vidět v Tabulce 10, tak u Merbau nenabývají hodnoty změny objemu statistické významnosti.

Tabulka 10 Více-faktorová analýza rozptylu hodnotící změnu objemu [mm³] po dobu 96 hodin

Vyhodnocující prvek	Součet čtverců	Počet stupňů volnosti	Variace	Fisherův F-test	Ukazatel hladiny významnosti <i>p</i>
Abs. člen	45713736	1	45713736	2465,065	***
DV	40955	1	40955	2,208	NS
TM	708437	3	236146	12,734	***
DV x TM	726082	3	242027	13,051	***
Chyba	1279580	69	18545		

NS – statisticky nevýznamný, *** - statisticky významný. Přijetí statistické významnosti bylo při $P < 0.05$.

Podle Tabulky 11 jsou všechny testované charakteristiky statisticky významné. Statisticky nejvýznamnější je pokles hustoty u Meranti od teploty 160°C až do teploty 210°C. U Merbau je rozdíl statisticky málo významný. Nejvyšší statistickou významnost má přírůstek hustoty mezi termicky nemodifikovaným (20°C) a termicky modifikovanými tělesy (160°C) Merbau.

Tabulka 11 Více-faktorová analýza rozptylu hodnotící změnu hustoty [kg/m³] po dobu 96 hodin

Vyhodnocující prvek	Součet čtverců	Počet stupňů volnosti	Variace	Fisherův F-test	Ukazatel hladiny významnosti <i>p</i>
Abs. člen	2285907	1	2285907	4097,620	***
DV	13811	1	13811	24,758	***
TM	14692	3	4897	8,779	***
DV x TM	21991	3	7330	13,140	***
Chyba	40166	72	558		

NS – statisticky nevýznamný, *** - statisticky významný. Přijetí statistické významnosti bylo při $P < 0.05$.

Druh dřeviny a interakce sledovaných faktorů (DVxTM) jsou podle Tabulky 12 statisticky nevýznamné charakteristiky. Statisticky významná je pouze nepříliš výrazná změna u termické modifikace Meranti mezi 180°C a 210°C. Výše popsané změny charakteristik jsou patrné i z grafu na Obr.16.

Tabulka 12 Více-faktorová analýza rozptylu hodnotící změnu rozměrů v radiálním směru [mm] po dobu 96 hodin

Vyhodnocující prvek	Součet čtverců	Počet stupňů volnosti	Variace	Fisherův F-test	Ukazatel hladiny významnosti <i>p</i>
Abs. člen	19,37631	1	19,37631	697,9287	***
DV	0,00189	1	0,00189	0,0682	NS
TM	0,66706	3	0,22235	8,0091	***
DV x TM	0,17265	3	0,05755	2,0730	NS
Chyba	1,94338	70	0,02776		

NS – statisticky nevýznamný, *** - statisticky významný. Přijetí statistické významnosti bylo při $P < 0.05$.

V případě tangenciálního přírůstku rozměrů (Tabulka 13) není statisticky významný druh dřeviny ani interakce sledovaných faktorů (DVxTM). Statisticky významný je nárůst rozměrů u obou dřevin mezi 20°C a 160°C, zároveň od termické modifikace 160°C statistická významnost roste. Mezi teplotami termické modifikace 180°C a 210°C už je rozdíl statisticky velmi významný.

Tabulka 13 Více-faktorová analýza rozptylu hodnotící změnu rozměrů v tangenciálním směru [mm] po dobu 96 hodin

Vyhodnocující prvek	Součet čtverců	Počet stupňů volnosti	Variace	Fisherův F-test	Ukazatel hladiny významnosti <i>p</i>
Abs. člen	49,13849	1	49,13849	1313,643	***
DV	0,44203	1	0,44203	11,817	***
TM	2,00058	3	0,66686	17,827	***
DV x TM	0,17898	3	0,05966	1,595	NS
Chyba	2,65585	71	0,03741		

NS – statisticky nevýznamný, *** - statisticky významný. Přijetí statistické významnosti bylo při $P < 0.05$.

Jak je patrné v Tabulce 14 i na Obr. 18, tak u změn podélného přírůstku rozměru jsou všechny testované charakteristiky statisticky nevýznamné.

Tabulka 14 Více-faktorová analýza rozptylu hodnotící změnu rozměrů v podélném směru [mm] po dobu 96 hodin

Vyhodnocující prvek	Součet čtverců	Počet stupňů volnosti	Variace	Fisherův F-test	Ukazatel hladiny významnosti <i>p</i>
Abs. člen	0,622149	1	0,622149	84,01944	***
DV	0,002983	1	0,002983	0,40286	NS
TM	0,021911	3	0,007304	0,98633	NS
DV x TM	0,019314	3	0,006438	0,86943	NS
Chyba	0,510933	69	0,007405		

NS – statisticky nevýznamný, *** - statisticky významný. Přijetí statistické významnosti bylo při $P < 0.05$.

7.4.2 Srovnání účinků jednotlivých faktorů za použití Duncanova testu na změnu hodnot sledovaných charakteristik.

Podle Tabulky 15 lze vyjádřit následující interakci druhů dřevin a teploty termické modifikace u kterých se neprokázal statisticky významný rozdíl: mezi termicky nemodifikovaným (20°C) a termicky modifikovaným (160°C) Meranti, mezi Meranti (180°C) a všemi teplotami termické modifikace Merbau, u Merbau (180°C) s Merbau jak termicky nemodifikovaným (20°C), tak termicky modifikovaným na teplotu 160°C.

Tabulka 15 Změna hmotnosti [g] po 96 hodinách

Č.	Druh dřeviny	TM (°C)	(1) 3,262	(2) 3,051	(3) 2,481	(4) 1,939	(5) 2,389	(6) 2,646	(7) 2,378	(8) -
1	Meranti	20		0,086	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-
2	Meranti	160	0,086		0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	-
3	Meranti	180	0,000	0,000		0,000	0,451	0,178	0,447	-
4	Meranti	210	0,000	0,000	0,000		0,001	0,000	0,001	-
5	Merbau	20	0,000	0,000	0,451	0,001		0,048	0,933	-
6	Merbau	160	0,000	0,001	0,178	0,000	0,048		0,051	-
7	Merbau	180	0,000	0,000	0,447	0,001	0,933	0,051		-
8	Merbau	210	-	-	-	-	-	-	-	-

Následující interakce druhů dřevin a teploty termické modifikace, u kterých se neprokázal statisticky významný rozdíl, byla vyjádřena podle Tabulky 16: mezi 20°C a 160°C, stejně tak se 180°C modifikovaným Meranti, mezi Meranti (180°C) a všemi teplotami termické modifikace Merbau, mezi Merbau 20°C a 160°C), poslední hodnoty jsou u Merbau (180°C) a to jak s termicky nemodifikovaným (20°C), tak termicky modifikovaným na teplotu 160°C.

Tabulka 16 Změna objemu [mm³] po 96 hodinách

Č.	Druh dřeviny	TM (°C)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	Meranti	20		0,394	0,009	0,000	0,001	0,001	0,001	-
2	Meranti	160	0,394		0,054	0,000	0,012	0,013	0,011	-
3	Meranti	180	0,009	0,054		0,000	0,429	0,459	0,441	-
4	Meranti	210	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	-
5	Merbau	20	0,001	0,012	0,429	0,000		0,937	0,942	-
6	Merbau	160	0,001	0,013	0,459	0,000	0,937		1,000	-
7	Merbau	180	0,001	0,011	0,441	0,000	0,942	1,000		-
8	Merbau	210	-	-	-	-	-	-	-	

Podle Tabulky 17 lze vyjádřit následující interakci druhů dřevin a teploty termické modifikace u kterých se neprokázal statisticky významný rozdíl: u Meranti jsou to pouze hodnoty mezi 20°C a 160°C, další hodnoty teplot 180°C i 210°C u Meranti se všemi teplotami u Merbau, posledními hodnotami je teplota bez termické modifikace (20°C) se 160°C i 180°C. To samé platí mezi teplotami 160°C a 180°C u Merbau.

Tabulka 17 Změna hustoty [kg/m³] po 96 hodinách

Č.	Druh dřeviny	TM (°C)	(1) 215,0 7	(2) 205,55	(3) 166,51	(4) 141,58	(5) 145,55	(6) 161,07	(7) 158,49	(8) -
1	Meranti	20		0,370	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-
2	Meranti	160	0,370		0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	-
3	Meranti	180	0,000	0,001		0,040	0,080	0,608	0,496	-
4	Meranti	210	0,000	0,000	0,040		0,708	0,104	0,135	-
5	Merbau	20	0,000	0,000	0,080	0,708		0,186	0,225	-
6	Merbau	160	0,000	0,000	0,608	0,104	0,186		0,820	-
7	Merbau	180	0,000	0,000	0,496	0,135	0,225	0,820		-
8	Merbau	210	-	-	-	-	-	-	-	

Následující interakce druhů dřevin a teploty termické modifikace, viz. Tabulka 18, vyjadřují statisticky významný rozdíl: termicky nemodifikované Meranti (20°C) společně s termicky modifikovaným Merbau na teplotu 180°C, Meranti (210°C) se všemi teplotami i oběma druhy dřevin.

Tabulka 18 Změna rozměrů v radiálním směru [mm] po 96 hodinách

Č.	Druh dřeviny	TM (°C)	(1) .6500	(2) .5510	(3) .4960	(4) .2790	(5) .5890	(6) .5220	(7) .4522	(8) -
1	Meranti	20		0,222	0,072	0,000	0,422	0,127	0,024	-
2	Meranti	160	0,222		0,498	0,002	0,617	0,702	0,252	-
3	Meranti	180	0,072	0,498		0,009	0,269	0,732	0,590	-
4	Meranti	210	0,000	0,002	0,009		0,000	0,004	0,025	-
5	Merbau	20	0,422	0,617	0,269	0,000		0,409	0,118	-
6	Merbau	160	0,127	0,702	0,732	0,004	0,409		0,408	-
7	Merbau	180	0,024	0,252	0,590	0,025	0,118	0,408		-
8	Merbau	210	-	-	-	-	-	-	-	

Následující hodnoty interakce druhů dřevin a teploty termické modifikace, viz. Tabulka 19, vyjadřují statisticky významný rozdíl: termicky nemodifikované Meranti (20°C) společně s Merbau (20°C i 180°C), spjatost se stejnými teplotami u má i Meranti o teplotě 160°C. Meranti (210°C) se všemi teplotami i oběma druhy dřevin kromě termicky nemodifikovaným Merbau. Poslední hodnoty vyjadřující statisticky významný rozdíl jsou mezi Merbau (20°C) a (160°C).

Tabulka 19 Změna rozměrů v tangenciálním směru [mm] po 96 hodinách

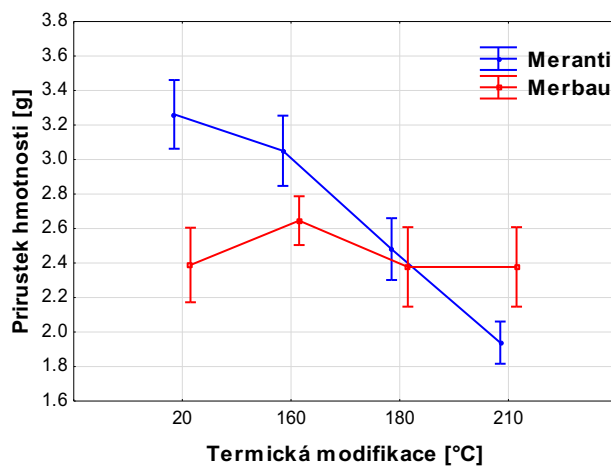
Č.	Druh dřeviny	TM (°C)	(1) 1.019	(2) .986	(3) .862	(4) .589	(5) .711	(6) .907	(7) .787	(8) -
1	Meranti	20		0,706	0,104	0,000	0,002	0,230	0,018	-
2	Meranti	160	0,706		0,184	0,000	0,005	0,368	0,039	-
3	Meranti	180	0,104	0,184		0,004	0,106	0,607	0,392	-
4	Meranti	210	0,000	0,000	0,004		0,166	0,001	0,034	-
5	Merbau	20	0,002	0,005	0,106	0,166		0,042	0,386	-
6	Merbau	160	0,230	0,368	0,607	0,001	0,042		0,199	-
7	Merbau	180	0,018	0,039	0,392	0,034	0,386	0,199		-
8	Merbau	210	-	-	-	-	-	-	-	-

U změn rozměrů v podélném směru žádná hodnota interakce druhů dřevin či teplot termické modifikace neprokázala statisticky významný rozdíl, jak je vyjádřeno v Tabulce 20.

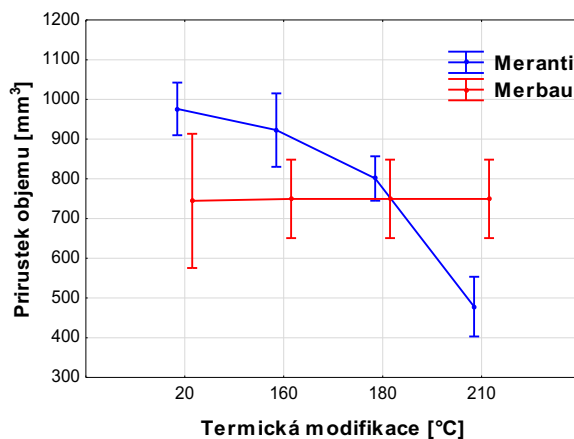
Tabulka 20 Změna rozměrů v podélném směru [mm] po 96 hodinách

Č.	Druh dřeviny	TM (°C)	(1) .077	(2) .099	(3) .039	(4) .122	(5) .086	(6) .118	(7) .096	(8) -
1	Meranti	20		0,628	0,340	0,335	0,821	0,373	0,667	-
2	Meranti	160	0,628		0,191	0,588	0,769	0,632	0,940	-
3	Meranti	180	0,340	0,191		0,076	0,267	0,088	0,206	-
4	Meranti	210	0,335	0,588	0,076		0,435	0,920	0,556	-
5	Merbau	20	0,821	0,769	0,267	0,435		0,480	0,814	-
6	Merbau	160	0,373	0,632	0,088	0,920	0,480		0,604	-
7	Merbau	180	0,667	0,940	0,206	0,556	0,814	0,604		-
8	Merbau	210	-	-	-	-	-	-	-	-

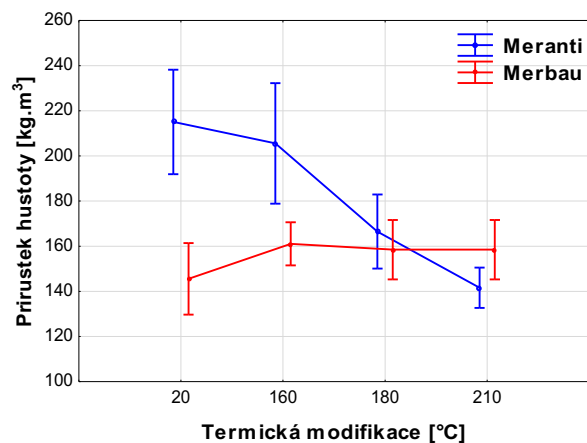
Na následujících obrázcích jsou vyjádřeny grafické průběhy mezi jednotlivými sledovanými charakteristikami a teplotami termické modifikace, případně sledovanými charakteristikami a druhy zkušebních dřevin. Všechny tyto průběhy jsou popsány u každé z tabulek. Na grafech je dobře patrná absence dat z termické modifikace Merbau o teplotě 210°C, která byla nahrazena daty z teploty 180°C. Takto nahrazená data neovlivňují průběh ani jedné z uvedených křivek Merbau mezi teplotami 20°C až 180°C.



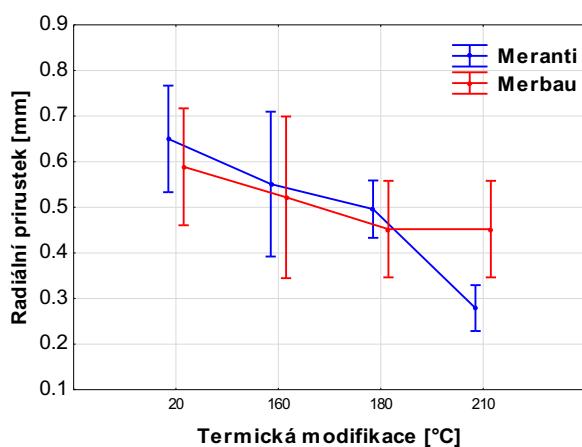
Obr. 12 Vliv termické modifikace na přírůstek hmotnosti při ponoření tělesa do vody



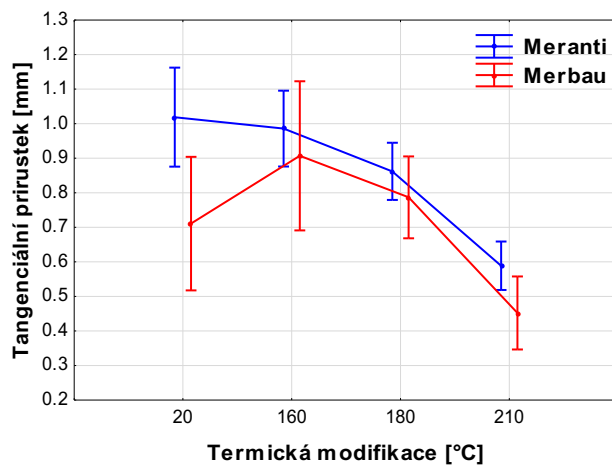
Obr. 13 Vliv termické modifikace na přírůstek objemu při ponoření tělesa do vody



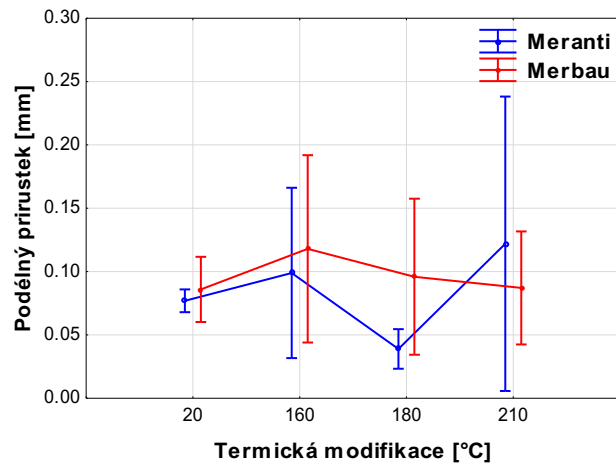
Obr. 14 Vliv termické modifikace na přírůstek hustoty při ponoření tělesa do vody



Obr. 15 Vliv termické modifikace na změnu rozměrů v radiálním směru při ponoření tělesa do vody



Obr. 16 Vliv termické modifikace na změnu rozměrů v tangenciálním směru při ponoření tělesa do vody



Obr. 17 Vliv termické modifikace na změnu rozměrů v podélném směru při ponoření tělesa do vody

8 Závěr

Podle vyhodnocení výzkumu rázové houževnatosti a nasákavosti termicky modifikovaného tropického dřeva se dospělo k výsledku, že vlivem termické modifikace Meranti ztrácí svou pevnost v ohybu z hodnoty $22,6 \text{ J/cm}^2$ na hodnotu 11 J/cm^2 a pozvolna klesá i hustota, z původních 548 kg/m^3 na 536 kg/m^3 . U Merbau se termickou modifikací dala, za poklesu hustoty z 922 kg/m^3 na 794 kg/m^3 , pevnost v ohybu zvýšit z 26 J/cm^2 při teplotě 20°C na $32,8 \text{ J/cm}^2$ při teplotě 160°C . Od teploty 180°C rapidně ztrácí svou pevnost - na $15,3 \text{ J/cm}^2$, což představuje přibližně poloviční úbytek pevnosti oproti teplotě 160°C . Hustota se snížila na 723 kg/m^3 . Při teplotě 210°C se dá předpokládat další úbytek pevnosti i hustoty.

Na nasákavost má termická modifikace pozitivní vliv pouze u Meranti, kde již od nejnižší teploty modifikace (160°C) dochází k ubývání nárustu hmotnosti i objemu. Oproti změně hmotnosti u termicky nemodifikovaných a termicky modifikovaných vzorků (210°C) je rozdíl $1,4 \text{ g}$. Co se týče rozdílu u nárustu hmotnosti Merbau nemá termická modifikace téměř žádný vliv. U rozdílu změny objemu má vliv spíše mírně negativní. Drobné nepřesnosti mohly vzniknout při lehce rozdílném měření na jednotlivých vzorcích. Z toho plyne, že čím vyšší teplotou je dřevo Meranti modifikováno, tím má lepší tvarovou i objemovou stálost. Na dřevo Merbau nemá výška teploty vliv. Při termické modifikaci záleží také na druhu dřevin, protože, jak již bylo uvedeno, se nemusí některé dřeviny z důvodu technické chyby podařit termicky modifikovat.

9 Seznam použité literatury

ČSN EN 310:1995 Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu.

ISO 13061-10:2017 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva – Stanovení pevnosti v ohybu.

ISO 13061-1:2014 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva – Stanovení obsahu vlhkosti pro fyzikální a mechanické testování.

ISO 13061-2:2014 Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva – Stanovení hustoty pro fyzikální a mechanické testování.

ČSN 49 0104:1988 Skúšky vlastností rasteného dreva. Metóda zisťovania nasiakavosti a navlhavosti

akela. EOPORY. *akela.mendelu.cz*. [Online] [Citace: 13. Duben 2018.]
https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/EOPORY/DROCH-Drevo_a_jeho_ochrana/droch_cv_05-FVD.pdf.

ARA. Dřeviny. *www.arakolin.cz*. [Online] [Citace: 13. Duben 2018.]
<http://www.arakolin.cz/cs/dreviny/meranti>.

Brittontimbers. 2012. Articles. *www.brittontimber.com.au*. [Online] 19. Červenec 2012. [Citace: 13. Duben 2018.] <http://www.brittontimbers.com.au/articles/thermally-modified-wood-the-green-alternative-to-tropical-timbers>.

Gaff, M. a Gáborík, J. 2009. *Vlastnosti povrchu dřeva modifikovaného reliéfováním*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 978-80-228-2035-6.

Gandelová, Libuše. 2009. *Nauka o dřevě*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2009. 978-80-7375-312-2.

Horáček, Petr. 2008. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 2008.

Jartek. Solutions. *www.jartek.fi*. [Online] [Citace: 4. Duben 2018.]
<http://www.jartek.fi/en/solutions/thermowood-kilns>.

LUNAWOOD, OY. 2017. *Lunawood Brochure 2017*. [Online] 2017. [Citace: 5. Duben 2018.]
<http://www.lunawood.com/wp-content/uploads/2017/11/Lunawood-Brochure-2017-Eng.pdf>.

—. **2018.** *Lunawood Product Portfolio 2018 ENG*. [Online] 2018. [Citace: 5. Duben 2018.]
http://www.lunawood.com/wp-content/uploads/2018/02/Lunawood_Product-Portfolio_2018_ENG.pdf.

Macháček, Josef. Macháček. *fsv.cvut.cz*. [Online] [Citace: 13. Duben 2018.]
<http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNNK/NNK-11.pdf>.

Matovič, Anton. 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva.* Brno : Vysoká škola zemědělská, 1993. 80-7157-086-9 .

Mendelu. eknihovna. *is.mendelu.cz.* [Online] [Citace: 13. Duben 2018.] https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9190.

—. eknihovna. *is.mendelu.cz.* [Online] [Citace: 17. Duben 2018.] <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?cast=9192>.

MEZISTROMY. 2016. Dřevařství Vlastnosti dřeva. *www.mezistromy.cz.* [Online] 29. Prosinec 2016. [Citace: 13. Duben 2018.] <https://www.mezistromy.cz/drevarstvi/vlastnosti-dreva/odborny>.

Mirako. Downloads. *www.mirako.at.* [Online] [Citace: 17. Duben 2018.] http://www.mirako.at/pdf_neu/thermoholz_allgemeine_information_3_gb.pdf.

Orwa, C., a další. 2009. Agroforestry database. *www.worldagroforestry.org.* [Online] 2009. [Citace: 13. Duben 2018.] <http://www.worldagroforestry.org/treedb/>.

Pánek, Miloš. 2015. Vlastnosti dřevostaveb. *stavba.tzb-info.cz.* [Online] 19. Říjen 2015. [Citace: 14. Duben 2018.] <https://stavba.tzb-info.cz/vlastnosti-drevostaveb/13333-tropicke-dreviny-jejich-vyhody-a-problemy-pri-pouziti>.

Požgaj, Alexander. 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva.* Bratislava : Príroda, 1997. 80-07-00960-4.

PROKOM. 2013. Tepelně upravené dřevo ThermoWood. *www.prokom.cz.* [Online] 2013. [Citace: 5. Duben 2018.] <http://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/128-drevene-profily-tepelne-upravene-specialni-technologie-thermowood>.

Šlezingerová, Jarmila. 2013. Lexikon tropických dřev. *ldf.mendelu.cz.* [Online] 2013. [Citace: 14. Duben 2018.] http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/tropicka_dreva/karta.htm?drevina=intsia.

Stará, Jana. 2014. Dřevo. *dřevostavitel.* [Online] 24. Listopad 2014. [Citace: 13. Duben 2018.] <https://www.drevostavitel.cz/clanek/ktere-drevo-je-nejlepsi>.

Strojari. Rázová zkouška. *www.strojari.wz.cz.* [Online] [Citace: 4. Duben 2018.] http://www.strojari.wz.cz/kom/razova_zkouska.htm.

ÚFMI. Kontrolní a zkušební metody. *ufmi.ft.utb.cz.* [Online] [Citace: 17. Duben 2018.] http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf.

Zeida, J., a další. 2015. eknihovna. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.* [Online] 2015.
[Citace: 5. Duben 2018.] <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?cast=9192>.