

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Ohybové vlastnosti vrstveného materiálu na bázi zhuštěného
dřeva**

Bakalářská práce

Ilia Shilkin

Dřevařství

Zpracování dřeva

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Iliia Shilkin

Dřevařství
Zpracování dřeva

Název práce

Ohybové vlastnosti vrstveného materiálu na bázi zhuštěného dřeva

Název anglicky

Bending properties of laminated wood based on densified wood

Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je posouzení vlivu aplikace zhuštěného dřeva do skladby vrstvených materiálů a dopadu na jejich mechanické vlastnosti v ohybu. Vybrané mechanické charakteristiky budou stanoveny pomocí čtyř bodového ohybu. Výsledkem práce bude posouzení změny ohybových charakteristik vzhledem ke změněné skladbě vrstveného materiálu a stupněm zhuštění jednotlivých vrstev dřeva.

Metodika

1. Literární rozbor problematiky vlivu zhuštění dřeva na ohybové vlastnosti při aplikaci ve vrstvených materiálech,
2. Navržení metodiky tvorby zkušebních těles a jejich testování,
3. Experimentální zjištění vlivu zhuštění dřeva na vybrané ohybové charakteristiky,
4. Statistické vyhodnocení a na základě zjištěných dat kvantifikace vlivu zhuštění dřeva na sledované ohybové charakteristiky,
5. Práci čleňte do standardních kapitol – úvod, literární rozbor, cíl práce, materiál a metodika, výsledky, diskuse, závěr, použitá literatura a souhrn.

Harmonogram práce:

1. Konceptní řešení práce (říjen 2022).
2. Analýza problematiky s důrazem na téma práce (listopad 2022).
3. Metodika práce (listopad 2022).
4. Experimentální měření (prosinec 2022).
5. Výsledky a diskuse (leden 2023).
6. Závěr (březen 2023).

Doporučený rozsah práce

40 – 50 stran

Klíčová slova

Zhustěné dřevo, Čtyřbodový ohyb, Ohybové vlastnosti, Vrstvené dřevo

Doporučené zdroje informací

- Gaff, M., a Babiak, M. (2018). "Tangent modulus as a function of selected factors," *Composite Structures*, 163 (1), 410-422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.052>
- Gaff, M., Gašparík, M., Babiak, M., a Vokatý, V. (2017). "Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region," *Composite Structures*, 163(1), 410-422. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.052>
- Gaff, M., Vokatý, V., Babiak, M., Bal, B. (2016). "Coefficient of wood bendability as a function of selected factors," *Construction and Building Materials* 126:632-640. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.085
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., a Babiak, M. (1993). „Štruktúra a Vlastnosti Dřeva,“ *Príroda a. s.*, Bratislava, Slovakia. 486 p.

Předběžný termín obhajoby

2022/23 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Přemysl Šedivka, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 12. 7. 2022

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 31. 8. 2022

prof. Ing. Róbert Marušák, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 04. 04. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Ohybové vlastnosti vrstveného materiálu na bázi zhuštěného dřeva" jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 5.4.2024

Poděkování

Rád bych zde poděkoval Ing. Adamu Sikorovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a neocenitelnou podporu během celého procesu tvorby té práce. Jeho schopnost poskytnout cenné rady, které se dotýkaly nejen teoretického podkladu, ale i praktického využití poznatků, byla nejen inspirací, ale i klíčovým prvkem vedoucím k dokončení práce.

Ohybové vlastnosti vrstveného materiálu na bázi zhuštěného dřeva

Souhrn

Tato bakalářská práce se věnuje posouzení ohybových vlastností vrstveného materiálu na bázi zhuštěného dřeva. Klíčovým cílem je zkoumání, jak aplikace zhuštěného dřeva ovlivňuje mechanické vlastnosti vrstvených materiálů při ohybu. K dosažení tohoto cíle byla využita metodika čtyř bodového ohybového testu, skrze kterou byly stanoveny vybrané mechanické charakteristiky. Výzkum byl zaměřen na analýzu změn ohybových charakteristik vrstvených materiálů v závislosti na skladbě a stupni zhuštění jednotlivých vrstev dřeva.

Práce začíná literárním přehledem týkajícím se vlivu zhuštění dřeva na ohybové vlastnosti ve vrstvených materiálech, následovaným navržením metodiky pro vytváření zkušebních těles a jejich testování. Dále byl proveden experimentální výzkum s cílem zjistit, jak zhuštění dřeva ovlivňuje ohybové charakteristiky, a na základě získaných dat bylo provedeno statistické vyhodnocení. Cílem statistického vyhodnocení bylo kvantifikovat vliv zhuštění dřeva na ohybové vlastnosti vrstvených materiálů.

V práci byly dále diskutovány zjištěné výsledky, které ukázaly, že aplikace zhuštěného dřeva má signifikantní dopad na ohybové vlastnosti vrstvených materiálů. Zvýšení stupně zhuštění vedlo ke zlepšení mechanických charakteristik, což podporuje potenciál zhuštěného dřeva jako materiálu pro zvýšení pevnosti a odolnosti vrstvených dřevěných materiálů.

V závěrečné části jsou shrnuty hlavní poznatky práce a navrženy možnosti dalšího výzkumu v této oblasti.

Klíčová slova: ohybové vlastnosti, vrstvený materiál, zhuštěné dřevo, čtyřbodový ohyb

Bending properties of laminated material based on densified wood

Summary

This bachelor thesis focuses on the evaluation of the bending properties of laminated materials based on densified wood. The primary objective is to investigate how the application of densified wood affects the mechanical properties of laminated materials under bending. To achieve this goal, a four-point bending test methodology was employed to determine selected mechanical characteristics. The research aimed to analyze changes in the bending characteristics of laminated materials depending on the composition and degree of densification of the individual wood layers.

The thesis begins with a literature review concerning the influence of wood densification on the bending properties of laminated materials, followed by the design of a methodology for creating test specimens and testing them. Subsequent experimental research aimed to discover how wood densification affects bending characteristics, and based on the obtained data, a statistical evaluation was conducted. The purpose of the statistical evaluation was to quantify the influence of wood densification on the bending properties of laminated materials.

The work further discusses the findings, which revealed that the application of densified wood significantly impacts the bending properties of laminated materials. An increase in the degree of densification led to an improvement in mechanical characteristics, supporting the potential of densified wood as a material for enhancing the strength and durability of laminated wooden materials.

In the final part, the main insights of the thesis are summarized, and possibilities for further research in this area are proposed.

Keywords: bending properties, layered material, densified wood, four-point bending

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Cíl práce	11
3. Stavba dřeva	11
3.1 Dřevo.....	11
3.2 Struktura dřeva	12
3.3 Vliv Struktury na Vlastnosti Dřeva	12
4. Modifikace dřeva.....	13
4.1 Úvod do problematiky modifikace dřeva	13
4.2 Metody modifikace dřeva	13
4.3 Zhuštění dřeva	15
4.3.1 Metody Zhuštění	15
4.4 Vliv na strukturu dřeva	17
5. Vlastnosti dřeva	19
5.1 Vlhkost Dřeva	19
5.2 Hustota Dřeva	20
5.3 Vliv Vlhkosti na Hustotu Dřeva	20
6. Pevnost v ohybu.....	20
6.1 Vypočet pevnosti v ohybu.....	21
6.2 Modul pružnosti	22
6.3 Čtyřbodový ohyb	23
7. Teorie lepení.....	24
7.1 Problematika lepení dřeva.....	24
7.2 Adheze a koheze.....	25
7.3 PUR lepidlo	26
8. Vrstvené dřevo	26
8.1 Výroba	27

8.2 Výhody a použití	27
9. Metodika	28
9.1 Výběr materiálu a jeho vlastnosti	28
9.2 Příprava a kategorizace vzorků	29
9.3 Aklimatizace vzorků	29
9.4 Proces zhuštění a jeho vliv na materiál	30
9.5 Proces lepení.....	30
9.6 Postup zkoušky	32
10. Výsledky	34
10.1 Porovnání výsledků	34
10.2 Popisná statistika zjištěných veličin.....	35
10.2.1 Pevnost v ohybu	36
10.2.2 Modul pružnosti.....	37
11. Diskuze	39
12. Závěr	40
13. Literatura.....	42
14. Seznam použitých zkratk a symbolů	47
15. Přílohy	48

1. Úvod

Ve světě moderních technologií a stavebnictví se vrstvené materiály stávají nezbytnými pro své unikátní vlastnosti, jako jsou odolnost, pevnost a flexibilita. Kombinace několika vrstev různých kompozitů nebo materiálů spojených lepidly či jinými spojovacími technikami nabízí mimořádné možnosti pro inovace v oblastech od dopravy po nábytek. Tato bakalářská práce zkoumá dopad zhuštěného dřeva, materiálu zpracovaného pro zvýšení jeho kompaktnosti a mechanické odolnosti, na ohybové charakteristiky existujících vrstvených materiálů. Budakçı, Şenol, a Korkmaz (2022) ukazují, že zhuštěné dřevo, s jeho zvýšenou pevností a odolností, představuje významný potenciál pro zlepšení vlastností vrstvených materiálů, zejména v kontextu ohybové pevnosti a pružnosti, které jsou zásadní pro návrh a výpočty stavebních konstrukcí. Použitím metodologie čtyřbodového ohybu (Monetto a Massabò, 2021), běžně užívané v materiálovém inženýrství, se práce pokouší objasnit, jak změna kompozice a stupeň zhuštění dřeva ovlivňuje tyto klíčové parametry. Cílem této práce je poskytnout hlubší porozumění vlastnostem a potenciálu zhuštěného dřeva v aplikacích vrstvených materiálů a nabídnout směrnice pro optimalizaci a vývoj nových materiálů pro různorodé použití. Přínos výzkumu by mohl pozitivně ovlivnit širokou škálu průmyslových odvětví a vědeckých oborů, poskytující důležité informace pro další výzkum a rozvoj v oblasti vrstvených materiálů. Struktura práce je navržena tak, aby čtenáře postupně prováděla od teoretických základů, přes experimentální metody, až po praktické aplikace a závěry. Úvodní kapitola poskytuje přehled o vrstvených materiálech a zhuštěném dřevě, následovaná detailním popisem metodologie čtyřbodového ohybu a experimentálního postupu. V závěrečných kapitolách jsou prezentovány a diskutovány výsledky experimentů, poskytující cenné vhledy do potenciálu zhuštěného dřeva jako inovativního materiálu pro zlepšení mechanických vlastností vrstvených konstrukcí. Tento výzkum nejen zdůrazňuje význam vrstvených materiálů a možnosti jejich dalšího vývoje, ale také poukazuje na důležitost praktické aplikace vědeckých poznatků v reálném světě. Výsledky a zjištění prezentované v této práci mají ambici obohatit stávající praxi a otevřít nové cesty pro inovace ve stavebnictví, dopravě, nábytkářství a dalších relevantních oblastech.

2. Cíl práce

Primárním cílem této práce je provést detailní hodnocení efektu použití zhuštěného dřeva na mechanické charakteristiky kompozitních materiálů, s osobitým důrazem na jejich ohybové vlastnosti. K dosažení tohoto cíle byly stanoveny následující specifické úkoly:

- Vymezení určitých mechanických parametrů kompozitních materiálů pomocí čtyřbodového ohybového testu.
- Analýza změn ohybových charakteristik kompozitních materiálů v závislosti na míře komprese dřevěných složek.
- Představení aktuálních poznatků ve výzkumu a vývoji kompozitních materiálů a komprimovaného dřeva.
- Popis metod a technik použitých při zkoumání mechanických vlastností kompozitních materiálů.
- Hodnocení výsledků provedených experimentů a diskuse
- Hypotéza této práce vychází z předpokladu, že zvýšení míry zhuštění dřevěných složek přispívá k signifikantnímu zlepšení mechanických vlastností kompozitních materiálů, především co se týče ohybové pevnost a modulu pružnosti. Tato teze bude ověřena na základě experimentálně získaných dat a analýzy výsledků.

V sekci "Výsledky" budou prezentovány zásadní poznatky získané z experimentálních testů, včetně srovnání mechanických vlastností kompozitních materiálů při různých úrovních zhuštění. Výstupy této práce by měly přinést cenné informace jak pro průmyslové tak ekologické využití a podpořit vývoj nových materiálů s vylepšenými mechanickými charakteristikami.

3. Stavba dřeva

3.1 Dřevo

Dřevo je udržitelný materiál s malou uhlíkovou stopou, který je vyhledáván pro jeho estetiku a schopnost izolace. Jeho aplikace se rozkládají od stavebních komponent až po oblasti módy a obuvi. Díky výborným vlastnostem v oblasti tepelné izolace přispívá k lepší energetické efektivitě budov, což jej činí lákavou volbou pro projekty zaměřené na udržitelnost (Kundela, 2012; Nováková, 2018). Podle výzkumu je možné dřevo účinně kombinovat s dalšími materiály, například s polymery, aby vznikly kompozitní materiály s lepšími charakteristikami (Sandberg a kol. 2018).

Avšak dřevo vyžaduje pravidelnou péči k prevenci před škůdci, plísněmi a hnilobou. Jeho schopnost hořet rovněž představuje potenciální nebezpečí, pokud není správně upraveno (Kulich, 2014). Jakožto přírodní materiál může dřevo vykazovat variability ve svých vlastnostech, což může být nevýhodou pro některé použití. Ačkoli se jedná o obnovitelný zdroj, nešetrná těžba může vést k oslabení lesních zásob a snížení biodiverzity (Marie, 2018).

3.2 Struktura dřeva

Makrostruktura Dřeva

Makrostruktura dřeva je viditelná pouhým okem a zahrnuje prvky, jako jsou letokruhy, jádro a běl, stejně jako různé typy dřevních vad. Jádro, obvykle tmavší barvy, obsahuje starší xylém a je charakteristické pro jeho vyšší odolnost proti rozkladu (Kundela, 2012). Na druhé straně, běl obsahuje mladší xylém a je typicky světlejší a méně odolná. Letokruhy, tvořené cykly růstu stromu, jsou zřetelně viditelné jako prstence, které označují věk dřeva (Sandberg a kol. 2018).

Mikrostruktura Dřeva

Na mikroskopické úrovni se dřevo skládá z buněčných struktur, včetně cév, tracheid, vláken a parenchymatických buněk. Cévy, přítomné primárně v dřevě listnatých stromů, slouží k transportu vody a minerálních látek. Tracheidy, nalezené v jehličnanech, plní podobnou funkci, ale také přispívají k mechanické pevnosti dřeva. Vláknina jsou zodpovědná za pevnost a tuhost, zatímco parenchymatické buňky slouží pro skladování a transport živin (Nováková, 2018).

3.3 Vliv Struktury na Vlastnosti Dřeva

Struktura dřeva má přímý vliv na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Makrostruktura ovlivňuje vzhled dřeva a je důležitá pro estetické hodnocení, zatímco mikrostruktura určuje vlastnosti, jako jsou pevnost, tuhost a odolnost proti vodě. Variabilita v mikrostruktuře mezi různými druhy dřeva může vést k široké škále vlastností, což umožňuje využití dřeva v různých aplikacích (Kulich, 2014).

4. Modifikace dřeva

4.1 Úvod do problematiky modifikace dřeva

Dřevo jako tradiční a obnovitelný materiál má významné místo v historii i současnosti lidské civilizace. S jeho širokou škálou využití od stavebnictví, nábytkářství až po papírenský průmysl však přichází i potřeba zlepšovat jeho vlastnosti, aby lépe vyhovovalo moderním požadavkům. Modifikace dřeva se stala důležitým vědeckým a technologickým oborem, který se zabývá právě tímto zdokonalováním.

Hlavním cílem modifikace dřeva je zlepšit jeho vlastnosti, jako je odolnost proti hnilobě, vodě, požáru, a zvýšit jeho stabilitu a trvanlivost. To zahrnuje různé techniky a metody, které mění fyzikální, chemické nebo biologické charakteristiky dřeva tak, aby lépe vyhovovalo specifickým aplikacím (Daňková a kol. 2014).

Modifikace dřeva může probíhat různými způsoby, včetně tepelného zpracování, chemické modifikace, impregnace ochrannými látkami nebo použitím kompozitních technologií. Tepelné zpracování, například, zlepšuje odolnost dřeva proti biodegradaci a snižuje jeho hygroskopičnost tím, že mění strukturu celulózy a ligninu. Chemická modifikace, jako je acetylace nebo furfurylace, přidává nebo odstraňuje chemické skupiny v polymerech dřeva, což vede k lepší odolnosti a stabilitě (Kudela, 2012).

Modifikované dřevo nachází široké uplatnění tam, kde je vyžadována vyšší odolnost materiálu nebo specifické vlastnosti, jako je nízká hořlavost nebo odolnost vůči vodě. To zahrnuje venkovní konstrukce, jako jsou terasy, fasády, dřevěné mosty, ale i interiérový nábytek a podlahové krytiny. Výhodou je také možnost využití méně kvalitního dřeva, které by jinak nebylo pro mnoho aplikací vhodné.

4.2 Metody modifikace dřeva

Modifikace dřeva je proces, jehož cílem je zlepšit fyzikální, chemické a biologické vlastnosti dřeva, aby lépe vyhovovalo specifickým požadavkům. Tento proces je klíčový pro rozšíření možností využití dřeva v různých aplikacích. Následující text nabízí přehled a zhuštění informací o hlavních metodách modifikace dřeva využívaných v současnosti.

Tepelná Modifikace

Tepelná modifikace dřeva zahrnuje ošetření dřeva teplem (obvykle mezi 160 °C až 260 °C) v prostředí s nízkým obsahem kyslíku. Tento proces vede k chemickým změnám ve složení dřeva, jako je degradace hemicelulózy, což zlepšuje jeho odolnost proti hnilobě a snižuje hygroskopičnost. Tepelně modifikované dřevo má také zlepšenou dimensionální stabilitu (Sandberg a kol. 2018).

Chemická Modifikace

Chemická modifikace dřeva zahrnuje použití chemických látek k změně nebo stabilizaci jeho struktury. Patří sem procesy jako acetylace, kde se do volných hydroxylových skupin celulózy vkládají acetyl skupiny, což snižuje schopnost dřeva vázat vodu a zvyšuje jeho odolnost proti biologické degradaci. Jiné metody zahrnují impregnaci dřeva ochrannými látkami proti škůdcům a hnilobě (Kudela, 2012).

Impregnace

Impregnace dřeva je proces, při kterém jsou do jeho struktury zavedeny ochranné chemikálie nebo látky zlepšující jeho vlastnosti. Metoda využívá různé techniky pro zvýšení penetrace ochranných látek, včetně vakua a tlaku. Impregnace může poskytovat dřevu lepší odolnost proti hnilobě, škůdcům a požáru. Tato metoda je často používána u dřeva vystaveného náročným venkovním podmínkám (Daňková a kol. 2014).

Přestože modifikace dřeva nabízí mnoho výhod, existují také výzvy spojené s každou metodou. Tepelná modifikace může způsobit ztrátu pevnosti dřeva, zatímco chemická modifikace vyžaduje použití potenciálně nebezpečných chemikálií. Impregnace zase může ovlivnit recyklovatelnost dřeva. Každá metoda vyžaduje pečlivou úvahu nad jejími ekonomickými a environmentálními dopady.

Různé metody modifikace dřeva hrají klíčovou roli ve vylepšení a rozšíření použití dřeva jako materiálu. Ať už jde o zlepšení odolnosti proti hnilobě, zvýšení dimensionální stability nebo zlepšení odolnosti proti požáru, každá metoda nabízí specifické výhody. Současný výzkum a inovace v oblasti modifikace dřeva pokračují

ve vývoji nových a udržitelných technologií, které mohou přinést ještě lepší vlastnosti tomuto tradičnímu materiálu.

4.3 Zhuštění dřeva

Zhuštění dřeva je proces, při němž se upravuje vnitřní struktura dřeva tak, aby se dosáhlo vyšší hustoty materiálu. Tento proces zvyšuje pevnost a odolnost dřeva proti mechanickému poškození a zlepšuje jeho estetické vlastnosti. Při zhuštění se dřevo vystavuje kombinaci tepla a tlaku, což vede k trvalé deformaci buněčných stěn a následnému zmenšení objemu dřeva bez použití chemických látek. Výsledkem je dřevo s vyšší hustotou, tvrdostí a lepšími mechanickými vlastnostmi (Navi & Heger, 2004).

4.3.1 Metody Zhuštění

Metoda Termomechanická

Termomechanické zhuštění dřeva kombinuje teplo a mechanický tlak k trvalé modifikaci struktury dřeva. Tento proces zahrnuje ohřev dřeva na vysoké teploty (obvykle mezi 150 °C až 230 °C) a následné aplikování tlaku, což vede k deformaci a zhuštění buněčných stěn. Teplo uvolňuje vazby mezi molekulami v dřevě, což umožňuje jeho snazší deformaci pod tlakem. Výsledkem je dřevo s vyšší hustotou, lepší pevností a zvýšenou odolností proti otěru. Tato metoda je vhodná pro výrobu dřevěných komponent s vysokou odolností, jako jsou podlahy nebo nábytkové části (Navi & Heger, 2004).

Termo-hydro-mechanické zhuštění

Termo-hydro-mechanické zhuštění je varianta termomechanické metody, která do procesu zahrnuje i vodní páru. Dřevo je vystaveno teplu, tlaku a vodní páře současně, což zvyšuje plasticitu dřeva a umožňuje ještě efektivnější zhuštění. Přítomnost vodní páry pomáhá rovnoměrněji rozložit teplo a usnadňuje penetraci tlaku do hlubších vrstev dřeva. Tato metoda má za následek zlepšení odolnosti dřeva vůči biodegradaci a zvýšení jeho mechanických vlastností. Vhodná aplikace zahrnuje výrobu dřevěných prvků pro exteriérové použití, kde je požadována vysoká odolnost proti povětrnostním vlivům (Navi & Heger, 2004).

Metoda Mechanická

Mechanické zhuštění dřeva spočívá ve fyzické aplikaci tlaku na dřevo bez použití tepla nebo chemikálií. Tato metoda může zahrnovat různé techniky, jako je lisování dřeva mezi dvěma plochami nebo procházení dřeva mezi válcovými nebo pásovými lisami. Výsledkem je zhuštění buněčných stěn a zlepšení pevnosti dřeva. Tato metoda je často omezena na povrchovou úpravu dřeva a může vyžadovat další zpracování pro stabilizaci a udržení zhuštěné struktury (Navi & Heger, 2004).

Metoda Impregnace

Impregnace dřeva spočívá v pronikání ochranných nebo modifikačních látek do jeho struktury pod tlakem. Tento proces nejen zlepšuje fyzikální a biologické vlastnosti dřeva, ale může také přispět k jeho zhuštění. Impregnace se provádí pod tlakem, aby se zajistilo hluboké proniknutí impregnačních látek, jako jsou polymerizační monomery, které poté v dřevě polymerizují a zvyšují jeho celkovou hustotu a pevnost. Tato metoda je vhodná pro aplikace, kde je vyžadována vysoká odolnost proti hnilobě, škůdcům nebo vlhkosti (Navi & Heger, 2004).

Výhody Zhuštění Dřeva

Zhuštěné dřevo nabízí řadu výhod:

- **Zvýšená pevnost a tvrdost:** Zhuštěním se zlepší mechanické vlastnosti dřeva, což z něj činí vhodný materiál pro náročnější aplikace.
- **Lepší odolnost proti otěru:** Hustší struktura dřeva zvyšuje jeho odolnost proti otěru, což je ideální pro podlahy a další plochy podléhající opotřebení.
- **Estetická vylepšení:** Zhuštění může zlepšit vzhled dřeva tím, že zvýrazní jeho přirozenou texturu a barvu.
- **Zvýšená odolnost proti vodě:** Zhuštěné dřevo má nižší absorpci vody díky své hustší struktuře.

Spring-Back

Jednou z výzev zhuštění dřeva je tzv. "spring-back" efekt, což je tendence dřeva vracet se zpět do své původní formy po odstranění tlaku. Aby bylo možné tento efekt minimalizovat, je nutné pečlivě kontrolovat podmínky zhuštění, včetně teploty, tlaku a doby zpracování. Výzkum v této oblasti pokračuje s cílem vyvinout metody, které

by stabilizovaly strukturu zhuštěného dřeva a redukovaly tento efekt (Navi & Heger, 2004).

4.4 Vliv na strukturu dřeva

Zhuštění dřeva má významný vliv na jeho strukturu a vlastnosti. Tento proces, při kterém je dřevo vystaveno kombinaci tepla, tlaku a v některých případech i vodní páře, vede k trvalým změnám v mikrostrukturální úrovni dřeva.

Vliv na Buněčnou Strukturu

Zhuštění způsobuje deformaci buněčných stěn a zmenšení buněčných dutin, což vede ke zvýšení hustoty dřeva. Proces může také ovlivnit orientaci mikrofibril v buněčných stěnách, což přispívá ke zvýšení mechanické pevnosti a tvrdosti zhuštěného dřeva (Pelit a kol. 2015). Tato strukturální změna je základem pro zlepšení mnoha vlastností dřeva, včetně jeho odolnosti proti otěru a mechanické pevnosti.

Změny ve Vodní Absorpci

Díky zhuštění dochází k redukci vodní absorpce a zvýšení hydrofobních vlastností dřeva. Redukce volného prostoru v buněčné struktuře omezuje schopnost dřeva absorbovat a udržovat vodu, což vede ke zlepšení dimensionalní stability a odolnosti proti vlhkosti (Welzbacher & Rapp, 2007).

Odolnost vůči Biodegradaci

Zhuštěné dřevo vykazuje lepší odolnost vůči biodegradaci, neboť zvýšená hustota a snížená pórovitost ztěžují průnik a kolonizaci mikroorganismů. Kromě toho změny ve chemické kompozici dřeva během zhuštění, jako je degradace hemicelulóz, mohou ztížit jeho rozklad mikroorganismy (Fang a kol. 2012).

Spring-Back Efekt

Jedním z omezení procesu zhuštění je tzv. "spring-back" efekt, což je tendence dřeva vracet se částečně nebo úplně do své původní formy po odstranění tlaku. Tento efekt je spojen s elastickými vlastnostmi dřeva a může být ovlivněn různými faktory, včetně

teploty a vlhkosti během zhuštění (Laine a kol. 2013).

Význam zhušťování

Zhuštění dřeva v praxi nabízí široké spektrum významných výhod a aplikací, které reagují na rostoucí požadavky na udržitelnost, odolnost a estetickou kvalitu materiálů používaných ve stavebnictví, nábytkářství a dalších průmyslových odvětvích. Vliv zhuštění dřeva na jeho vlastnosti a použití lze shrnout do několika klíčových bodů:

Zvýšení Mechanické Pevnosti a Odolnosti

Zhuštěné dřevo má vyšší pevnost a odolnost proti mechanickému poškození díky těsnější a hustší buněčné struktuře. To z něj činí ideální materiál pro aplikace, kde jsou na materiál kladeny vysoké nároky, jako jsou podlahy, pracovní desky, nábytkové komponenty a dokonce i konstrukční prvky ve stavebnictví (Pelit a kol. 2015).

Zlepšená Odolnost proti Vlhkosti a Biodegradaci

Díky nižší schopnosti absorbovat vodu zhuštěné dřevo lépe odolává vlivům vlhkosti, což snižuje riziko rozvoje plísní, hniloby a napadení škůdci. Tato vlastnost rozšiřuje možnosti použití dřeva i v náročnějších venkovních aplikacích a prostředích s vyšší vlhkostí (Welzbacher & Rapp, 2007).

Estetická Vylepšení

Proces zhuštění může zlepšit estetické vlastnosti dřeva tím, že zvýrazní jeho přirozenou texturu a barvu. Výsledné dřevo může mít bohatší a hlubší odstíny, což je žádoucí pro dekorativní aplikace, jako je nábytkářství a interiérový design.

Ekologická Udržitelnost

Zhuštění dřeva umožňuje efektivnější využití zdrojů tím, že zvyšuje vlastnosti méně kvalitního dřeva, což podporuje udržitelnost a snižuje potřebu využívání dřeva z primárních zdrojů. Tento proces také odpovídá rostoucím trendům v oblasti ekodesignu a zeleného stavebnictví.

Efektivní Využití Materiálu

Díky vylepšeným vlastnostem může být zhuštěné dřevo použito v aplikacích, pro které by tradiční dřevo nebylo dostatečně odolné. To umožňuje designérům a architektům větší flexibilitu při výběru materiálů a přispívá k inovativnímu využití dřeva v různých odvětvích.

Aplikace ve Speciálních Oborech

Speciální zhuštěné dřevěné materiály nacházejí uplatnění i v specifických oblastech, jako jsou hudební nástroje, kde jsou vyžadovány materiály s konkrétními akustickými vlastnostmi, nebo ve sportovním vybavení, kde je potřeba kombinace lehkosti a vysoké odolnosti.

5. Vlastnosti dřeva

Dřevo je materiál, jehož vlastnosti se mohou významně lišit v závislosti na řadě faktorů, včetně druhu dřeva, jeho stáří, podmínek růstu a způsobu zpracování. Dvě základní vlastnosti, které mají klíčový vliv na použití dřeva v praxi, jsou jeho vlhkost a hustota. Tyto vlastnosti ovlivňují nejen pevnost a trvanlivost dřeva, ale také jeho zpracovatelnost a odolnost proti degradaci.

5.1 Vlhkost Dřeva

Vlhkost dřeva je kritický parametr, který ovlivňuje jeho roztažnost, smrštění, pevnost a odolnost proti biologickým škůdcům. Dřevo absorbuje vlhkost z okolního prostředí, což může vést k jeho rozpínání nebo smršťování. Rovnovážná vlhkost dřeva (EMC) je stav, kdy dřevo přestává absorbovat nebo uvolňovat vlhkost do okolního vzduchu. EMC se liší v závislosti na relativní vlhkosti a teplotě okolního prostředí (Kollmann & Côté, 1968).

$$W = ((m_w - m_d)/m_d) * 100 \%$$

kde **m_w** je hmotnost vlhkého dřeva a **m_d** je hmotnost zcela suchého dřeva.

5.2 Hustota Dřeva

Hustota dřeva, často vyjádřená jako hmotnost na jednotku objemu, je dalším zásadním ukazatelem jeho vlastností. Hustota má přímý vliv na pevnost, tvrdost a tepelné vlastnosti dřeva. Vyšší hustota obvykle indikuje větší pevnost a tvrdost, což činí dřevo vhodnějším pro náročnější konstrukční aplikace. Hustota se může lišit nejen mezi různými druhy dřeva, ale i v rámci jednoho stromu, přičemž dřevo z jádra stromu má obvykle vyšší hustotu než dřevo z vnějších částí (Hoadley, 2000).

$$\rho = m / V$$

kde **m** je hmotnost dřeva (vlhkého nebo suchého) a **V** je jeho objem.

5.3 Vliv Vlhkosti na Hustotu Dřeva

Vlhkost a hustota dřeva jsou vzájemně propojené vlastnosti. S rostoucí vlhkostí se objem dřeva zvětšuje, což vede k poklesu jeho hustoty. Naopak při sušení dřeva se jeho objem zmenšuje, což zvyšuje jeho hustotu. Při konstantní hmotnosti dřeva a změnách jeho objemu v důsledku absorpce nebo uvolňování vlhkosti dochází k přímým změnám v hustotě dřeva (Walker, 2006).

$$\Delta L = L_0 * \alpha * \Delta W$$

kde ΔL je změna délky, L_0 je původní délka, α je koeficient lineární roztažnosti a ΔW je změna vlhkostního obsahu.

6. Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu dřeva je kritickým parametrem, který odráží schopnost dřevěných materiálů odolávat deformaci a zlomení pod ohybovým zatížením. Tato vlastnost je základem pro navrhování a využívání dřeva v konstrukčních aplikacích, jako je výroba nábytku, stavebnictví, a další oblasti, kde je dřevo vystaveno zatížení působícím kolmo na jeho délku.

6.1 Výpočet pevnosti v ohybu

Pevnost v ohybu dřeva je klíčovým parametrem při posuzování jeho mechanických vlastností a vhodnosti pro konstrukční použití. Dřevo, jakožto anizotropní a heterogenní materiál, vykazuje odlišné mechanické vlastnosti v závislosti na směru zatížení vzhledem k vláknům. Při výpočtu pevnosti v ohybu je třeba tyto faktory zohlednit, stejně jako vlhkost dřeva a možnou přítomnost vad ve struktuře materiálu (Doitrand, 2021).

Tříbodové a čtyřbodové ohybové testy

Pro výpočet pevnosti v ohybu dřeva se často využívají tříbodové a čtyřbodové ohybové testy. Tyto metody poskytují spolehlivá měření ohybové pevnosti a modulu elasticity dřeva pod zatížením (Monetto a Massabò, 2021).

Tříbodový test: Tento test aplikuje zatížení na střed vzorku dřeva podporovaného na obou koncích. Výsledná pevnost v ohybu (F_b) se vypočítá pomocí vzorce:

$$F_b = \frac{3FL}{2bd^2}$$

kde F je aplikovaná síla, L je rozpětí mezi podporami, b je šířka a d je tloušťka vzorku.

Čtyřbodový test: Aplikuje zatížení na dvě body, což zajišťuje rovnoměrnější rozložení napětí v centrální části vzorku. Tento test je obzvláště užitečný pro materiály s nehomogenními vlastnostmi, jako je dřevo.

Faktory ovlivňující pevnost v ohybu

Při výpočtu pevnosti v ohybu dřeva je třeba zohlednit několik faktorů, včetně:

Směr vláken: Dřevo je silnější a tužší ve směru vláken než napříč vlákny.

Vlhkost: Vysoká vlhkost dřeva snižuje jeho pevnost v ohybu.

Vady: Uzly, praskliny a jiné vady ve struktuře dřeva mohou výrazně ovlivnit jeho ohybovou pevnost.

Je důležité si uvědomit, že výsledky získané z těchto testů mohou být ovlivněny mnoha faktory, včetně vlhkosti dřeva, směru zrna a přítomnosti defektů, jako jsou uzly nebo praskliny. Vědci a inženýři proto často provádějí rozsáhlé testování a používají statistické metody k určení typických hodnot pevnosti v ohybu pro specifické druhy dřeva a podmínky použití.

6.2 Modul pružnosti

Modul pružnosti (E) dřeva je klíčovým parametrem, který charakterizuje jeho schopnost odolávat deformaci pod vlivem vnějšího zatížení. Tato vlastnost je zásadní pro návrh a výpočet dřevěných konstrukcí, jelikož umožňuje predikovat, jak se materiál bude chovat pod zatížením. Modul pružnosti se měří v megapascaly (MPa) a je definován jako poměr mezi napětím (σ) a příslušným poměrným prodloužením (ϵ) v lineárně elastické oblasti materiálu, což lze vyjádřit vztahem:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Výzkumy v oblasti dřevěných materiálů ukazují, že modul pružnosti dřeva se liší v závislosti na řadě faktorů, včetně druhu dřeva, vlhkosti, směru zrna a teploty. Specificky u smrku obyčejného bylo experimentálně zjištěno, že radiální moduly pružnosti jarního a letního dřeva se liší, což dokládá studie Michala Vida (2018), kde byly zkoumány tyto rozdíly metodou korelace digitálního obrazu (DIC). Tato metoda umožnila přesně určit modul pružnosti pro celý vzorek dřeva i pro jeho jednotlivé části, a to jak pro jarní, tak pro letní dřevo. Průměrné hodnoty modulu pružnosti zjištěné pomocí DIC byly pro celý vzorek 993,88 MPa, zatímco pro letní dřevo dosahovaly hodnot až 1226,67 MPa a pro jarní dřevo 909,67 MPa.

Tyto výsledky podtrhují význam pochopení a zohlednění modulu pružnosti při navrhování a realizaci dřevěných konstrukcí, aby bylo dosaženo požadované pevnosti a stability s ohledem na specifické použití materiálu.

6.3 Čtyřbodový ohyb

Ve stavebnictví a materiálovém inženýrství hraje ohybová pevnost klíčovou roli v hodnocení a výběru materiálů pro různé aplikace. Jedním z nejčastějších testů používaných k určení ohybové pevnosti je čtyřbodový ohybový test, standardizovaný podle normy ČSN EN 408. Tento test je zásadní pro určení mechanických vlastností dřeva, což umožňuje inženýrům a designérům lépe pochopit, jak různé typy dřeva reagují na ohybové zatížení.

V čtyřbodovém ohybovém testu je vzorek dřeva umístěn na dva opěrné body a zatížen pomocí dvou dalších bodů, které jsou umístěny symetricky mezi opěrnými body (Doitrand, 2021).

Vzorec pro výpočet maximálního ohybového napětí v materiálu během čtyřbodového ohybového testu je následující:

$$f_m = \frac{M}{W}$$

kde W je odporový moment průřezu, který závisí na geometrii průřezu vzorku. Pro obdélníkový průřez je W vypočten jako:

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

kde b je šířka a h je výška průřezu vzorku.

- d je tloušťka vzorku (mm).

Použití tohoto vzorců umožňuje přesně určit ohybovou pevnost materiálu, což je klíčové pro vývoj bezpečných a trvanlivých stavebních konstrukcí. Například, Li, He, a Li (2023) prozkoumali vliv velikosti na ohybovou pevnost lamelového dřeva z čínského modřínu a zjistili, že parametry vzorku mají významný vliv na výsledné mechanické vlastnosti.

Z hlediska aplikace tohoto testu na dřevo a dřevěné kompozity, Cao et al. (2022) zkoumali termální vodivost a ohybovou pevnost kompozitů SiC posílených uhlíkovými vlákny na bázi dehtu. Jejich zjištění poskytují cenné informace o

možnostech zlepšení mechanických vlastností dřevěných kompozitů, což je nezbytné pro inovativní aplikace ve stavebnictví.

Test čtyřbodového ohybu podle normy ČSN EN 408 je proto neocenitelným nástrojem pro hodnocení a výběr dřevěných materiálů pro stavební aplikace. Díky přesnému určení ohybové pevnosti umožňuje tento test inženýrům a designérům navrhovat bezpečnější a odolnější konstrukce, přičemž využívají přednosti dřeva jako obnovitelného a udržitelného stavebního materiálu.

7. Teorie lepení

7.1 Problematika lepení dřeva

Lepení dřeva je zásadní technika využívaná ve výrobě nábytku, stavebnictví a mnoha dalších aplikacích, kde je dřevo klíčovým materiálem. Lepené spoje musí být dostatečně pevné, aby vydržely běžné zatížení, a zároveň musí být odolné vůči různým vnějším podmínkám, jako je vlhkost, teplotní změny a biologický útok.

Klíčové faktory ovlivňující kvalitu lepeného spoje:

- **Typ dřeva:** Různé druhy dřeva mají různou strukturu a povrchovou absorpci, což může ovlivnit přilnavost lepidla.
- **Příprava povrchu:** Povrch dřeva musí být před lepením řádně připraven, obvykle brusným papírem, aby se odstranily nečistoty a zvýšila povrchová adheze.
- **Typ lepidla:** Existuje mnoho typů lepidel vhodných pro lepení dřeva, včetně PVA (polyvinylacetátu), epoxidových, polyuretanových a dalších speciálních lepidel. Výběr lepidla závisí na požadovaných vlastnostech spoje.
- **Aplikace lepidla:** Rovnoměrná aplikace a správné množství lepidla jsou klíčové pro vytvoření pevného spoje.
- **Tlak a doba vytvrzení:** Aplikovaný tlak a doba, po kterou je tlak udržován, musí být dostatečné pro konkrétní typ lepidla a lepených materiálů.

Výzkum v oblasti lepení dřeva

Petr Ženatý (2016) ve své práci zkoumal kvalitu lepení kombinovaných masivních materiálů na bázi dřeva s použitím různých druhů polyuretanových lepidel. Jeho

výzkum byl zaměřen na identifikaci nejlepší kombinace dřevěných materiálů a lepidel pro výrobu dřevěných oken.

Pavel Stehlík (2017) se ve své bakalářské práci zaměřil na vliv pojivové báze lepidla a typu lepeného spoje na pevnost lepeného spoje masivního dřeva akátu. Jeho práce přispěla k lepšímu pochopení vztahu mezi typem lepidla, druhem spoje a výslednou pevností.

7.2 Adheze a koheze

Adheze a koheze jsou základní fyzikální jevy, které hrají klíčovou roli v mnoha oblastech vědy a techniky, včetně materiálového inženýrství, biologie a chemie. Adheze se týká vzájemné přilnavosti dvou různých materiálů na jejich rozhraní, zatímco koheze odkazuje na síly držící spolu molekuly stejného materiálu.

Adheze

Adheze je klíčová pro výkon lepidel, nátěrových hmot a v mnoha bioinženýrských aplikacích, kde je důležitá interakce mezi biologickými a syntetickými materiály. Jedním z výzkumů v této oblasti je studie Silvie Kozielové (2019), která se zabývala flexibilitou a adhezí cementových lepidel při různém stupni modifikace polymerním pojivem. Tento výzkum poskytuje užitečné poznatky pro vývoj lepidel s optimalizovanou adhezí pro stavební aplikace.

Koheze

Koheze je důležitá pro udržení integrity materiálů a má významné dopady na jejich mechanické vlastnosti, jako je pevnost a pružnost. Koheze ovlivňuje například vlastnosti polymerních kompozitů, kde je důležité pochopení vnitřních sil držících spolu materiál pro optimalizaci jeho výkonnosti.

Výzkum J. Holčíka (2014) se zaměřil na adhezi a kohezi a jejich vliv na vlastnosti sendvičových struktur. Tento výzkum podtrhuje význam těchto dvou jevů pro vývoj a použití vysoce výkonných sendvičových materiálů s vynikajícími mechanickými vlastnostmi a odolností.

7.3 PUR lepidlo

V oblasti výroby nábytku a dalších aplikacích, kde je prioritou vysoká pevnost lepeného spoje a odolnost proti různým teplotním a vlhkostním podmínkám, se PUR lepidla, neboli polyuretanové lepidla, stala významným prvkem. Tato lepidla poskytují vynikající pevnost spoje, jsou flexibilní a odolávají vodě a většině chemikálií (Lichtenberg, 2016). Díky těmto vlastnostem se PUR lepidla jeví jako ideální volba pro lepení materiálů, které jsou vystaveny extrémním podmínkám, například pro lepení nábytkových hran z exotického dřeva (Maršálek, 2017) nebo v aplikacích, kde je vystavenost vysoké vlhkosti, jako je případ koupelnového nábytku (Landová, 2016).

Schopnost PUR lepidel vytvářet pevné spoje s různorodými materiály umožňuje jejich široké využití jak v průmyslových, tak v domácích aplikacích. Výzkum ukázal, že PUR lepidla si zachovávají své vlastnosti i při nízkých teplotách, což je činí ideálním řešením pro produkty, které mohou být vystaveny extrémním teplotním podmínkám během skladování nebo přepravy (Lichtenberg, 2016)

8. Vrstvené dřevo

Vrstvené dřevo je důležitým materiálem v moderní stavebnictví a designu, jeho využití je široké od konstrukčních prvků až po estetické aplikace. Jedná se o kompozitní materiál, který zvyšuje pevnost a stabilitu dřeva tím, že spojuje více vrstev dohromady, obvykle s použitím lepidel nebo jiných druhů spojovacích materiálů. Tento proces nejenže zlepšuje mechanické vlastnosti dřeva, ale také zvyšuje jeho odolnost vůči vlhkosti a škůdcům. Dřevo jako kompozitní a konstrukční materiál bylo podrobně popsáno v práci Sandberga, Kitek Kuzman a Milana (2018), kteří zdůrazňují jeho potenciál v oblasti udržitelného designu a stavebnictví. Další studie, kterou provedla Marie Davidová (2018), zkoumala dřevo jako primární médium pro architektonickou performanci, poukazující na jeho flexibilitu a schopnost adaptace na různé designové požadavky. Tato práce ilustruje, jak může být dřevo efektivně využito v rámci systematického přístupu k architektonické performanci.

8.1 Výroba

Výroba vrstveného dřeva zahrnuje několik klíčových kroků, které začínají výběrem a přípravou vhodného dřeva. V první fázi jsou dřevěné prkna pečlivě vybrána a ošetřena proti vlhkosti a škůdcům. Následně jsou tyto prkna řezána na požadovanou tloušťku a délku. K vytvoření vrstveného dřeva se prkna skládají vrstva po vrstvě, přičemž mezi jednotlivými vrstvami se aplikuje lepidlo nebo jiný spojovací materiál, který zajišťuje pevnost a stabilitu finálního produktu. Proces lisování pod vysokým tlakem a teplotou je dalším zásadním krokem, který pomáhá lepidlu proniknout hlouběji do dřeva a zajišťuje pevné spojení mezi vrstvami (Sandberg a kol., 2018). Po vytvrzení lepidla se povrch vrstveného dřeva upravuje - brousí se nebo frézuje, aby byl hladký a připraven k dalšímu použití v konstrukčních aplikacích nebo ve výrobě nábytku.

V posledních letech se výzkum zaměřil na vývoj nových metod a materiálů, které by mohly zlepšit vlastnosti vrstveného dřeva, zvýšit jeho odolnost a prodloužit životnost. Davidová (2018) například poukazuje na možnosti využití dřeva jako primárního média pro architektonickou performanci, což naznačuje potenciál pro inovace v materiálovém inženýrství a designu.

8.2 Výhody a použití

Vrstvené dřevo přináší řadu výhod v porovnání s masivním dřevem, což z něj dělá oblíbený materiál ve stavebnictví, nábytkářství a dalších odvětvích. Mezi klíčové výhody patří větší pevnost a stabilita, lepší odolnost proti vlhkosti a deformacím, a možnost využití v širším spektru aplikací díky lepším mechanickým vlastnostem a estetickému vzhledu. Loskot (2016) zdůrazňuje využití dřeva douglasky ve stavebnictví, kde se uplatňuje zejména pro konstrukční použití v dřevostavbách, výrobu oken, dveří, venkovních teras a dokonce i v lodním stavitelství. Kaláčová (2016) poukazuje na netradiční použití dřeva, například v oblasti módy, kde se dřevo stává součástí oděvů a nabízí tak nové možnosti pro designéry.

Výhody vrstveného dřeva:

- **Větší pevnost a stabilita:** Vrstvené dřevo je díky své struktuře pevnější a stabilnější než masivní dřevo.

- **Odolnost proti vlhkosti a deformacím:** Lepší odolnost proti vlhkosti a menší náchylnost k deformacím dělá z vrstveného dřeva ideální materiál pro použití v různých klimatických podmínkách.
- **Široké spektrum aplikací:** Díky svým vlastnostem se vrstvené dřevo uplatňuje v širokém spektru aplikací, od stavebnictví po designové prvky.

Použití vrstveného dřeva:

- **Stavebnictví:** Využívá se pro konstrukční prvky, stropy, stěny a další díly dřevostaveb.
- **Nábytkářství:** Výroba kvalitního nábytku, včetně stolů, židlí a skříní.
- **Venkovní aplikace:** Terasové desky, ploty a další venkovní prvky využívající odolnost dřeva proti povětrnostním vlivům.
- **Design a móda:** Netradiční využití v oblasti módy, například ve výrobě oděvů s dřevěnými prvky.

9. Metodika

Tato práce se zaměřuje na studium ohybové pevnosti bukového dřeva. Klíčovým aspektem zkoumání je vliv zhuštění na pevnost v ohybu, který je posuzován na pěti úrovních zhuštění: 0 %, 5 %, 10 %, 15 % a 20 %. Tento vliv je zkoumán prostřednictvím čtyřbodové ohybové zkoušky, jak je specifikováno v normě ČSN EN 408, která stanovuje přesné rozměry pro zkušební tělesa (vzorky). Cílem je odhalit, jak rozdílné stupně zhuštění materiálu ovlivňují jeho schopnost odolávat ohybovému namáhání, což poskytuje cenné poznatky pro aplikace, kde je ohybová pevnost klíčovým parametrem.

9.1 Výběr materiálu a jeho vlastnosti

V rámci této bakalářské práce byl použit buk lesní (*Fagus sylvatica* L.), který představuje listnatou dřevinu s rozptýlenými póry. Jeho dřevo je charakteristické střední tvrdostí a při relativní vlhkosti 12 % dosahuje průměrné čelní tvrdosti 61 MPa. Dále má střední hustotu přibližně 670 kg/m³. Tato dřevina se vyznačuje nejen svou pevností a odolností, ale také estetickým vzhledem, což ji činí ideálním materiálem pro výrobu nábytku, parket a dalších kvalitních stavebních a dekoračních prvků. Díky

svým vlastnostem je buk lesní často vyhledáván v oblasti stavebnictví a designu interiérů, kde se uplatňuje jak z hlediska funkčnosti, tak i estetiky.

9.2 Příprava a kategorizace vzorků

Pro účely experimentální části této studie byly z původních lamel nařezány vzorky s rozměry 300 mm na délku, 20 mm na šířku a s různou tloušťkou dle příslušnosti k jednotlivým skupinám. Referenční vzorky měly tloušťku 5 mm. Dále byly vzorky rozděleny do skupin podle míry zhuštění:

- Skupina s 5% zhuštěním měla počáteční tloušťku přibližně 5,26 mm.
- Skupina s 10% zhuštěním měla počáteční tloušťku přibližně 5,56 mm.
- Skupina s 15% zhuštěním měla počáteční tloušťku přibližně 5,88 mm.
- Skupina s 20% zhuštěním měla počáteční tloušťku přibližně 6,25 mm.

Celkový počet vzorků dosáhl čísla 250, přičemž každá skupina zahrnovala 50 vzorků. Následně byly všechny vzorky podrobeny měření rozměrů a váhy, aby byla zjištěna jejich průměrná hustota. Výsledky měření ukázaly, že průměrná hustota vzorků v reference skupině byla 718,16 kg/m³. U skupiny s 5% zhuštěním byla hustota 712,53 kg/m³, u 10% zhuštěním 697,47 kg/m³, u 15% zhuštěním 698,43 kg/m³ a u 20% zhuštěním 701,36 kg/m³. Tyto údaje poskytují základ pro další analýzu vlastností materiálu a jeho vhodnosti pro různé aplikace.

9.3 Aklimatizace vzorků

Po následujícím týdnu v klimatizované místnosti, aby bylo dosaženo 12% vlhkosti při teplotě 20 stupňů Celsia, byly vzorky znovu změřeny. Výsledky měření ukazují různé změny v hustotě materiálu v závislosti na procentním zastoupení vody: při 0% vlhkosti byla hustota 721,41, což představuje odchylku o 0,45%; při 5% vlhkosti byla hustota 702,79, což znamená pokles o 1,37%; při 10% vlhkosti byla hustota 692,51, s poklesem o 0,71%; při 15% vlhkosti byla hustota 708,57, což ukazuje nárůst o 1,45%; a při 20% vlhkosti byla hustota 700,51, což představuje mírnou odchylku o -0,12%.

Tyto výsledky naznačují, že kde byla konečná hustota nižší, vzorky absorbovaly vodu během dosahování 12% vlhkosti, což způsobilo jejich zvětšení. Naopak, kde byla hustota vyšší, došlo k vysušení materiálu, což způsobilo jeho smrštění. Tato

pozorování jsou klíčová pro porozumění vlivu vlhkosti na fyzikální vlastnosti materiálů.

9.4 Proces zhuštění a jeho vliv na materiál

V další fázi experimentu byly všechny vzorky zhutněny do konečné tloušťky 5 mm. Název každé skupiny odpovídá procentu zhuštění. Zhuštění proběhlo v teplem lisu, kde byla jak horní, tak i dolní část zahřívána na teplotu 160 stupňů Celsia. Vzorky byly pod tlakem 20 MPa a teplem udržovány po dobu 5 minut. Následně byly vzorky odloženy na týden, aby došlo k dosažení efektu tzv. spring-back, a poté byly znovu změřeny.

Výsledky měření po této fázi ukázaly zajímavé změny v hustotě materiálů v závislosti na procentu zhuštění. U skupiny s 20% zhuštěním byla zaznamenána hustota 801,60, což představuje zvýšení o 14,43%. Skupina s 15% zhuštěním měla hustotu 757,26, což je nárůst o 6,87%. U 10% zhuštění byla hustota 719,81, tedy zvýšení o 3,94%. Skupina s 5% zhuštěním vykazovala hustotu 702,79, což znamená zvýšení o 1,48%. Skupina s 0% zhuštěním zůstala beze změn, jelikož nebyla zhutněna.

Proces zhuštění, jak je z těchto výsledků patrné, má významný vliv na fyzikální vlastnosti materiálů. Zvýšení hustoty souvisí s mírou zhuštění, což ukazuje, že při větším zhuštění dochází k efektivnějšímu vytěsnění vzduchových mezer mezi částicemi materiálu, což vede ke zvýšení jeho hustoty. Tento efekt je důležitý pro aplikace, kde je požadována vysoká pevnost a odolnost materiálů, jelikož materiál s vyšší hustotou obvykle vykazuje lepší mechanické vlastnosti.

9.5 Proces lepení

Po dokončení fáze zhuštění byl dalším krokem v našem experimentálním postupu proces lepení. Vzorky byly pečlivě skládány do sestav po pěti kusech, čímž pro každou skupinu vzniklo celkem deset nových složených vzorků. Lepení bylo provedeno s použitím speciálního lepidla PUR, známého pod obchodním názvem ICEMA R 145/12. Toto lepidlo bylo zvoleno kvůli svým vynikajícím vlastnostem a schopnosti vytvořit pevné a trvalé spoje mezi jednotlivými vrstvami materiálu.



Obrázek č.1 Zhuštění vzorku (Zdroj: Vlastní)

Technický list lepidla ICEMA R 145/12 stanovuje, že pro dosažení optimálních výsledků je třeba aplikovat lepidlo ve množství 40 g/m^2 a následně vzorky slisovat po dobu 30 minut. Tento postup byl přísně dodržen pro všechny skupiny vzorků. Aplikace lepidla a jeho distribuce byla provedena s maximální pečlivostí, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozložení po celé ploše materiálů.

PUR lepidlo, použité v tomto experimentu, patří mezi polyuretanová lepidla, která se vyznačují vynikající pevností spoje, odolností vůči vodě a teplotním výkyvům. Jeho princip spočívá v chemické reakci s vlhkostí, při které dochází k vytvrzení a vytvoření pevného a trvalého spoje. Tato vlastnost činí PUR lepidlo ideálním pro aplikace, kde jsou kladeny vysoké nároky na pevnost a odolnost spojů.

Slisování vzorků bylo realizováno na ručním hydraulickém lisu, který umožňoval přesné a rovnoměrné rozložení tlaku po celé ploše vzorků. Tento manuální přístup k

lepení zajišťoval vysokou míru kontroly nad procesem a umožňoval přizpůsobení tlaku podle potřeb konkrétních vzorků.

Po dokončení lepení a slisování byly vzorky opět změřeny, aby bylo možné posoudit, jak lepení ovlivnilo jejich vlastnosti. Výsledky měření ukázaly, že hustota vzorků se zvýšila v závislosti na původním procentu zhuštění, což naznačuje, že lepení dále zvýšilo pevnost a kompaktnost materiálů. Konkrétní hodnoty hustoty pro jednotlivé skupiny byly 721,49 pro 0%, 770,05 pro 5%, 785,13 pro 10%, 840,11 pro 15% a 893,84 pro 20%.

9.6 Postup zkoušky

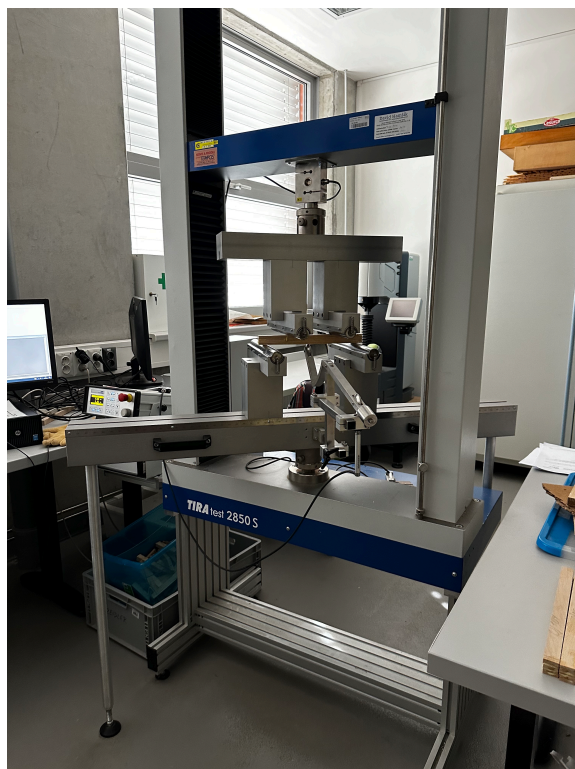
Testování ohybové pevnosti je jednou z fází experimentu, která byla zaměřena na pět skupin testovaných vzorků. Každá skupina, charakteristická různým stupněm zhuštění, měla deset předem připravených a zpracovaných vzorků podle přípravných kroků experimentálního postupu. Test byl zaměřen na celkový přehled toho, jak různé stupně zhuštění ovlivňují mechanické vlastnosti materiálu a byl navržen tak, aby umožnil vyhodnocení experimentálních dat ve vztahu k dostupným empirickým vztahům.

Testy ohybu probíhaly v kontrolovaných laboratorních podmínkách s použitím standardizovaných testovacích zařízení, která umožňovala nastavení a kontrolu zatížení aplikovaného na vzorky. Každý vzorek byl podroben postupnému zvyšování zatížení od 30 do 90 sekund nebo až do okamžiku, kdy došlo k poklesu síly o 40 % z maximálního zatížení, což bylo považováno za okamžik selhání materiálu. Metodologie prováděla testy za dobře zaměřených podmínek, s výsledkem rovné a objektivní evaluace ohybových vlastností a pevnosti materiálů ve všech testovaných skupinách.

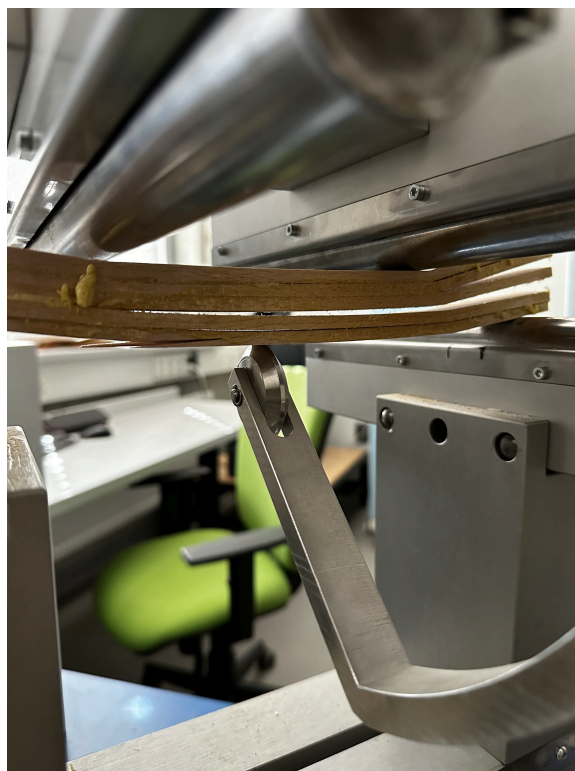
Všechny kritické parametry týkající se vzorku, jako je maximální zatížení, doba trvání testu a hodnoty snížení síly, byly pečlivě zaznamenány.

Na základě výše uvedených dat byla provedena podrobná analýza a bylo provedeno srovnání ohybových vlastností mezi dvěma děleními skupin. Analýza dat odhalila vzory a trendy, které jsou nejdůležitější pro pochopení účinku zhuštění na mechanické vlastnosti. Celkově fáze testování ohybové pevnosti experimentu poskytla zásadní

informace o ohybové pevnosti pro hodnocení a srovnání mechanických vlastností bukového dřeva s jeho stupněm hustoty.



Obrázek č.2 Zkouška ohybem (Zdroj: Vlastní)



Obrázek č.3 Porušený vzorek (Zdroj: Vlastní)

10. Výsledky

V této kapitole jsou prezentovány výsledky hodnocení ohybových vlastností vrstveného materiálu na bázi zhuštěného dřeva. Data byla pečlivě vyhodnocena a byly vypočítány klíčové statistické ukazatele, které odrážejí chování materiálu pod různými úrovněmi plošné hmotnosti.

Zhuštění(%)	Hustota (kg*m3)	Modul Pružnosti (MPa)	Pevnost v ohybu (MPa)
0 %	723,79	6724,37	50,94
5 %	765,01	10952,32	52,60
10 %	777,89	15425,50	93,54
15 %	837,25	17310,58	136,67
20 %	883,09	17694,31	182,28

Tabulka 1. Průměry vybraných charakteristik (Zdroj: Vlastní)

10.1 Porovnání výsledků

Z experimentálních dat byly vytvořeny tabulky a grafy, které umožňují systematické porovnání vlastností zkoumaných materiálů za různých podmínek hustoty. Níže uvedená tabulka shrnuje průměrné hodnoty pro každou zkoumanou vlastnost a poskytuje srovnání mezi skupinami.

Bylo objeveno, že se zvyšováním stupně zhuštění dochází ke zvýšení všech sledovaných vlastností materiálu. Při zhuštění od 0 % do 20 % narostla průměrná hustota z 723,79 kg/m³ na 883,09 kg/m³, což signalizuje zvýšení pevnosti materiálu.

Je však důležité poznamenat, jak ukazuje obrázek č. 3, že některé vzorky byly chybně nalepeny, což vedlo k delaminaci a významnému rozptylu hodnot, jak je vidět v příloze č. 1.

Rovněž se zvýšil modul pružnosti, což ukazuje na schopnost materiálu odolávat deformaci pod zatížením. U vzorků bez zhuštění byl modul pružnosti 6724,37 MPa, zatímco u vzorků se zhuštěním 20 % dosáhl až 17694,31 MPa. Tento nárůst naznačuje, že zhuštění výrazně zlepšuje tuhost materiálu.

Pevnost v ohybu, která odráží odolnost materiálu vůči ohýbání, se zvýšila téměř čtyřnásobně, z 50,94 MPa na 182,28 MPa při nejvyšším stupni zhuštění. Tato vlastnost je klíčová pro aplikace, kde je materiál vystaven ohybovým silám.

Nakonec, limit proporcionality, určující bod, kdy materiál začíná podléhat plastické deformaci, vzrostl z 23,88 MPa na 94,76 MPa. To dokládá zlepšenou schopnost materiálu pohlcovat energii bez dosažení bodu trvalé deformace.

Z těchto zjištění vyplývá, že zvýšení zhuštění má pozitivní dopad na mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu.

10.2 Popisná statistika zjištěných veličin

Byli provedeny sérii ANOVA testů, aby se určily statisticky významné rozdíly v průměrných hodnotách hustoty, pevnosti v ohybu a modulu pružnosti mezi různými skupinami zhuštění. Výsledky jsou následující:

- Pro hustotu:
 - F-hodnota: 32,854
 - p-hodnota: přibližně $7,94e-13$
- Pro pevnost v ohybu:
 - F-hodnota: 15,543
 - p-hodnota: přibližně $4,66e-08$
- Pro modul pružnosti:
 - F-hodnota: 14,399
 - p-hodnota: přibližně $1,21e-07$

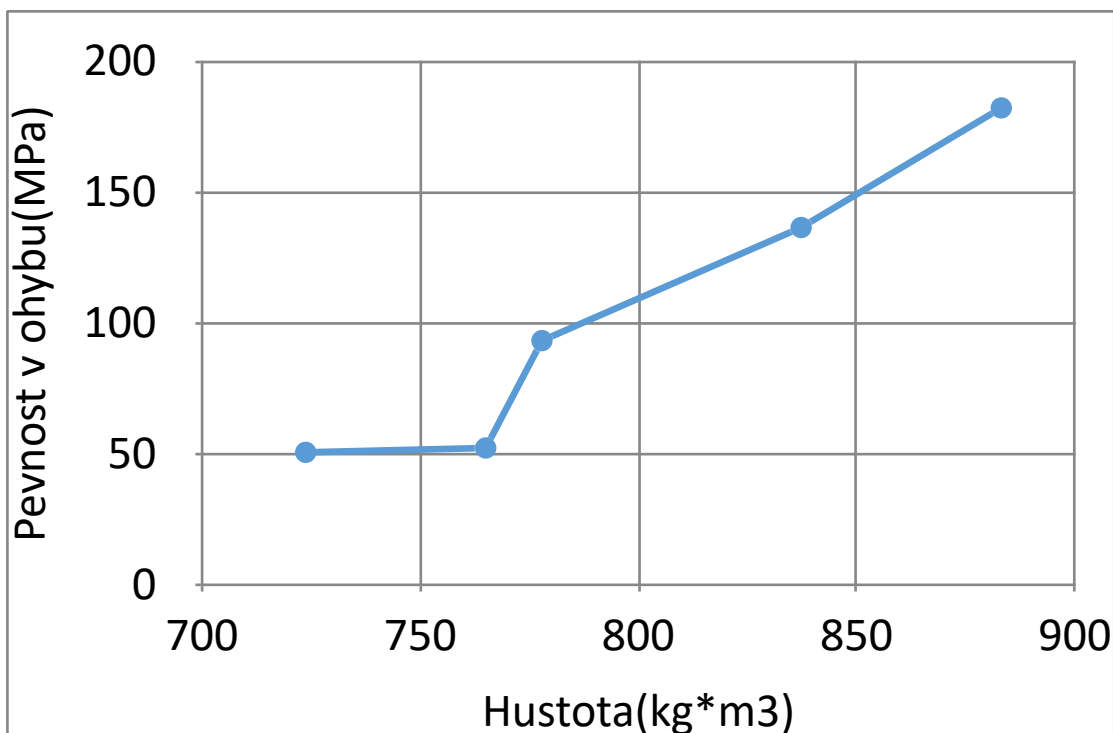
Ve všech případech byly p-hodnoty podstatně nižší než standardní hranice statistické významnosti 0,05, což naznačuje přítomnost statisticky významných rozdílů mezi skupinami. To znamená, že změny ve zhuštění mají vliv na hustotu, pevnost v ohybu i modul pružnosti materiálu. Tento nálezn podporuje hypotézu, že zhuštění má zásadní vliv na mechanické vlastnosti zkoumaného materiálu.

10.2.1 Pevnost v ohybu

	1	2	3	4	5
1	1.000000	0.987761	0.094528	0.001663	0.000034
2	0.987761	1.000000	0.097591	0.001753	0.000037
3	0.094528	0.097591	1.000000	0.140866	0.013525
4	0.001663	0.001753	0.140866	1.000000	0.318738
5	0.000034	0.000037	0.013525	0.318738	1.000000

Tabulka 2. Výsledky Dunnova testu pro Pevnost v ohybu (Zdroj: Vlastní)

Analýza pevnosti v ohybu odhalila, že s rostoucím stupněm zhuštění dochází k významnému nárůstu pevnosti. Skupina s 0% zhuštěním (hustota 723,79 kg/m³), skupiny 4 a 5 s 15% zhuštěním (hustota 837,25 kg/m³) a 20% zhuštěním (hustota 883,09 kg/m³) prokázaly statisticky významné výsledky ($p < 0.05$). To ukazuje, že zvýšení zhuštění z 0% na 15% a 20% vede k významnému zlepšení pevnosti v ohybu. Naopak, porovnání skupiny 0% se skupinami se zhuštěním 5% (hustota 765,01 kg/m³) a 10% (hustota 777,89 kg/m³) neodhalilo žádné statisticky významné rozdíly. To naznačuje, že mírné zhuštění nemá zásadní vliv na pevnost v ohybu. Tyto zjištění zdůrazňují význam zhuštění jako faktoru ovlivňujícího pevnost v ohybu materiálů.



Graf č.1. Vliv hustoty na pevnost v ohybu (Zdroj: Vlastní)

Graf č. 1 ilustruje vztah mezi hustotou bukového dřeva a jeho pevností v ohybu při různém stupni zhuštění. Je zřejmé, že s rostoucí hustotou se zvyšuje i pevnost v ohybu. Při nejnižší hustotě 723,79 kg/m³ dosahuje pevnost v ohybu hodnoty 50,94 MPa, zatímco při nejvyšší hustotě 883,09 kg/m³ pevnost v ohybu výrazně stoupá na 182,28 MPa. Tento trend ukazuje, že zhuštění dřeva přispívá k lepší odolnosti proti ohybu, což je klíčový parametr pro jeho využití ve strukturách, kde jsou tyto vlastnosti kritické.

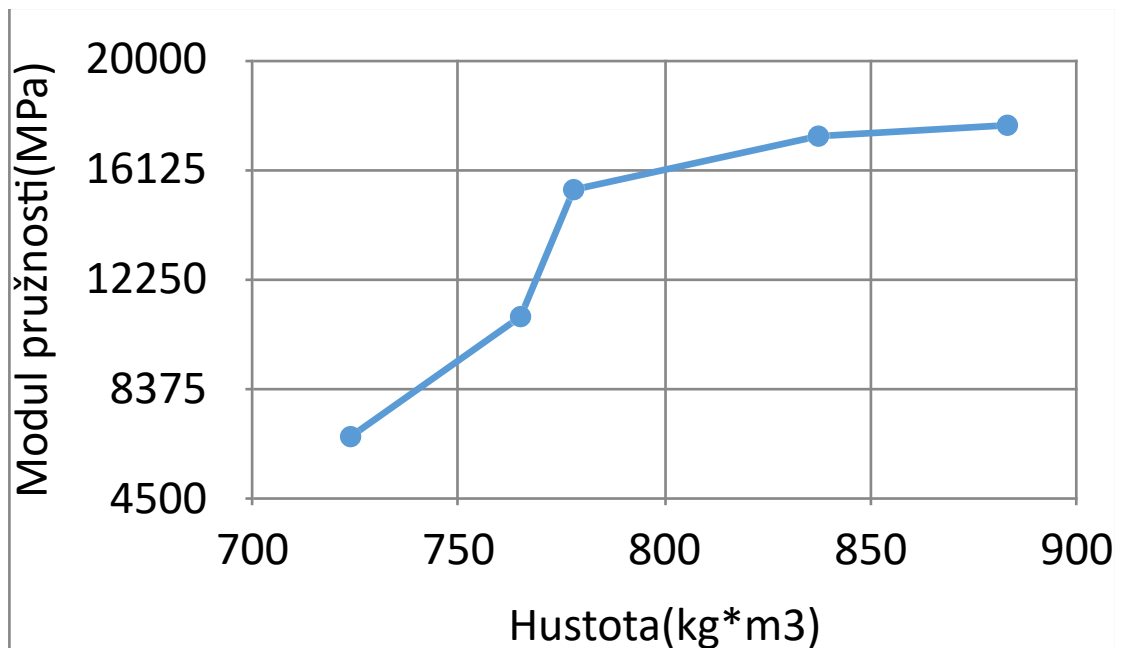
10.2.2 Modul pružnosti

	1	2	3	4	5
1	1.000000	0.365455	0.005496	0.000111	0.000028
2	0.365455	1.000000	0.061290	0.003072	0.001029
3	0.005496	0.061290	1.000000	0.276114	0.158181
4	0.000111	0.003072	0.276114	1.000000	0.747358
5	0.000028	0.001029	0.158181	0.747358	1.000000

Tabulka 3. Výsledky Dunnova testu pro Modul pružnosti (Zdroj: Vlastní)

Analogicky k pevnosti v ohybu, detailní analýza modulu pružnosti odhaluje, že skupina bez zhuštění (0 % zhuštění, s hustotou 723,79 kg/m³) a skupiny podrobené 15 % (hustota 837,25 kg/m³) a 20 % zhuštění (hustota 883,09 kg/m³) prokazují statisticky signifikantní difference ($p < 0.05$). Tyto výsledky poukazují na fakt, že eskalace zhuštění z 0 % na 15 % a 20 % má podstatný pozitivní dopad na modul pružnosti. V kontrastu, srovnání základní skupiny (0 % zhuštění) se skupinami s 5 % zhuštěním (hustota 765,01 kg/m³) a 10 % zhuštěním (hustota 777,89 kg/m³) neodkrylo statisticky významné rozdíly, což implikuje, že mírné stupně zhuštění nejsou zásadně relevantní pro modifikaci modulu pružnosti.

Tyto poznatky jednoznačně potvrzují, že proces zhuštění je klíčovým faktorem v optimalizaci modulu pružnosti materiálů, což je esenciální pro aplikace požadující materiály s vysokou rezistencí vůči deformacím.



Graf č.2. Vliv hustoty na modul pružnosti (Zdroj: Vlastní)

V grafu č. 2 je ilustrativně zobrazena korelace mezi hustotou a modulem pružnosti. Paralelně s ohybovou pevností je zaznamenán nárůst modulu pružnosti v závislosti na zvýšení hustoty materiálu. Pro vzorek s hustotou $723,79 \text{ kg/m}^3$ byl zjištěn modul pružnosti $6724,37 \text{ MPa}$, což je výrazně nižší v porovnání s hodnotou modulu pružnosti $17694,31 \text{ MPa}$ při hustotě $883,09 \text{ kg/m}^3$. Tato zjištění ilustrují, že zhuštění dřeva vede k významnému zvýšení odolnosti materiálu proti deformaci v důsledku ohybu, což nabízí značné výhody pro aplikace, kde je vyžadována vysoká tuhost materiálu.

11. Diskuze

Ve zmíněném experimentu byl pozorován výrazný nárůst ohybové pevnosti a modulu pružnosti bukového dřeva po procesu zhuštění, což kontrastuje s nižšími hodnotami, které jsou uvedeny v literatuře pro nezhuštěné vzorky. Specificky, ohybová pevnost byla zvýšena z 50,94 MPa na 182,28 MPa a modul pružnosti z 6724,37 MPa na 17694,31 MPa, což představuje signifikantní zlepšení mechanických vlastností.

Při porovnání s literárními údaji, jako jsou hodnoty uvedené Aydin et al. (2003), které uvádějí ohybovou pevnost vícevrstvých lepených výrobků (LVL) z bukových dýh v rozmezí 90,6 MPa do 120,85 MPa, bylo zřejmé, že zjištěné výsledky tyto standardní hodnoty překračují. Tento rozdíl může být připsán efektu zhuštění, který zvyšuje pevnostní charakteristiky dřeva tím, že zlepšuje jeho strukturální integritu a snižuje pravděpodobnost vzniku mikrotrhlin.

Důležité je také zdůraznit rozdíl ve způsobu zpracování materiálu. Zatímco studie jako Aydin et al. (2004) a Dudas (2008) se zaměřovaly na dřevo s nižší úrovní zhuštění nebo na jiné druhy dřeva, bylo ukázáno, jak výrazné zhuštění (až 20 %) bukového dřeva může vést k dramatickému zlepšení ohybové pevnosti a modulu pružnosti. To naznačuje, že zhuštění může hrát klíčovou roli ve zlepšování mechanických vlastností dřevěných materiálů, což má důležité implikace pro výrobu LVL a jiných dřevěných kompozitních materiálů.

Také bylo zohledněno, že použití vrstev o tloušťce 5 mm, na rozdíl od tenčích dýh v jiných studiích, kde tloušťka byla redukována na 1.3 mm po zhuštění (Gaff, M., Gašparík, M., 2015), mohlo přispět k lepší strukturální integritě a vyšším hodnotám mechanických vlastností. Tato metodika naznačuje potenciální přístup pro zlepšení pevnosti a modulu pružnosti dřevěných výrobků prostřednictvím optimalizace tloušťky a technik zpracování materiálu.

V konečném důsledku ukázaly zjištěné výsledky a jejich porovnání s literaturou na významný potenciál zhuštění jako metody pro zlepšení mechanických vlastností bukového dřeva. Tato zjištění mohou poskytnout důležitou zpětnou vazbu pro výzkumníky a výrobce ve snaze o optimalizaci vlastností dřevěných materiálů pro různé aplikace.

12. Závěr

Bylo zjištěno, že zhuštění dřeva v rozsahu od 0 % do 20 % má významný vliv na jeho mechanické parametry. Na počátku experimentu byly zaznamenány hodnoty pro modul pružnosti a pevnost v ohybu na úrovni 6724,37 MPa, resp. 50,94 MPa pro vzorky bez zhuštění (0 %). Po zvýšení stupně zhuštění na 20 % tyto hodnoty výrazně vzrostly na 17694,31 MPa pro modul pružnosti a na 182,28 MPa pro pevnost v ohybu.

Je důležité si uvědomit, že podle literatury by se modul pružnosti buku měl pohybovat okolo 8500-12700 MPa a pevnost v ohybu kolem 77-97 MPa (Badescu & Dumitrascu, 2013). Počáteční hodnoty (6724,37 MPa pro modul pružnosti a 50,94 MPa pro pevnost v ohybu) jsou tedy podstatně nižší než ty, které jsou běžně uvedeny v literatuře pro nezhuštěné vzorky bukového dřeva. Možné chyby při zpracování dřeva mohou skutečně hrát klíčovou roli v nižších hodnotách modulu pružnosti a pevnosti v ohybu pro nezhuštěné vzorky bukového dřeva, což vede k výsledkům podstatně nižším, než jsou ty běžně uváděné v literatuře. Tyto chyby mohou být způsobeny řadou faktorů v průběhu přípravy a testování vzorků, včetně nedostatečného polepu, nehomogenity materiálu, neadekvátního sušení nebo nevhodných podmínek skladování dřeva před zpracováním.

Nedostatečný polep může vést k vzniku mikrotrhlin a nehomogenit v materiálu, což má za následek snížení celkové strukturální integrity a mechanické odolnosti vzorků. Dále, nehomogenita materiálu, způsobená například různou hustotou dřeva, obsahem vlhkosti nebo přítomností vad dřeva, může způsobit významné rozdíly v mechanických vlastnostech jednotlivých vzorků.

Neadekvátní sušení dřeva může způsobit vnitřní napětí a deformace, což také negativně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Vlhkost dřeva má přímý vliv na jeho pružnost a pevnost; vzorky s vyšším obsahem vlhkosti mají tendenci mít nižší mechanické vlastnosti.

Poukazuje to na důležitost přísné kontroly procesu zpracování a přípravy vzorků při experimentálním měření mechanických vlastností dřeva. Zajištění konzistentního zpracování a testovacích podmínek je klíčové pro získání spolehlivých a reprezentativních dat o mechanických vlastnostech dřeva. Optimalizace těchto

procesů a eliminace potenciálních zdrojů chyb může vést ke zlepšení výkonnosti nezhuštěného i zhuštěného dřeva a k přesnějšimu porozumění vlivu různých zpracovatelských technik na jeho vlastnosti.

Nicméně, po aplikaci procesu zhuštění došlo k významnému zlepšení těchto vlastností, přičemž hodnoty modulu pružnosti i pevnosti v ohybu překročily běžně uváděné průměrné hodnoty. Naznačuje to, že zhuštění může sloužit jako účinná metoda pro zlepšení mechanických vlastností bukového dřeva, především v kontextu jeho využití ve vrstvených materiálech.

Rostoucí poptávka po udržitelných a výkonných materiálech ve stavebnictví a výrobě nábytku činí zhuštěné dřevo slibnou alternativou. Proces zhuštění vedl k signifikantnímu zlepšení mechanických vlastností, což naznačuje možnost širokého uplatnění tohoto přístupu v praxi. Budoucí výzkum by měl být zaměřen na další modifikace a kombinace technik zpracování dřeva s cílem rozšířit možnosti jeho aplikace a zvýšit tak výkonnost a trvanlivost dřevěných materiálů.

Zvýraznění důležitosti dalšího výzkumu v oblasti zhuštění dřeva je stěžejní. Kombinace zhuštění s dalšími technikami modifikace dřeva by mohla přinést další zlepšení mechanických vlastností. Dlouhodobé studie zaměřené na odolnost zhuštěného dřeva v různých prostředích a za různých zatěžovacích podmínkách by mohly poskytnout cenné informace o jeho trvanlivosti a životnosti. Optimalizace procesu zhuštění pro maximální zlepšení mechanických vlastností při minimalizaci dopadu na životní prostředí je dalším klíčovým směrem pro výzkum.

13. Literatura

Aydin, I., Çolak, S., Çolakoğlu, G., and Salih, E. Effect of boric acid treatment on mechanical properties of laminated beech veneer lumber [online]. 2003. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280715533_Effect_of_boric_acid_treatment_on_mechanical_properties_of_laminated_beech_veneer_lumber

Badescu, L., & Dumitrascu, R. Static bending strength and modulus of elasticity in static bending along the height of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) [online]. 2013. Dostupné z: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2013/CambridgeUK/STUPEME/STUPEME-02.pdf>

Budakçı, M., Şenol, S., & Korkmaz, M. Thermo-Vibro-Mechanic® (TVM) wood densification method: Mechanical properties [online]. 2022. Dostupné z: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2022/01/BioRes_17_1_1606_Budakci_SK_Thermo_Vibro_Mechanic_Wood_Densificat_Mechan_Props_19519.pdf

Cao, L., Liu, Y., Zhang, Y., Cao, Y., Li, J., Chen, J., Zhang, L., & Qi, Z. Thermal conductivity and bending strength of SiC composites reinforced by pitch-based carbon fibers [online]. 2022. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40145-021-0527-5.pdf>

Daňková, J., Murínová, T., Reinprecht, L., & Mamoňová, M. Modifikace dřeva silikony jako potenciálně perspektivní technologie ochrany dřevěných stavebních konstrukcí proti korozi [online]. 2014. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/276425667_Modifikace_dreva_silikony_jako_potencialni_perspektivni_technologie_ochrany_drevenych_stavebnich_konstrukci_proti_korozi

Dubovsky, J. Ohybové charakteristiky a kvalita dřeva. Vyd. 1. Zvolen : Technická univerzita Zvolen, 1993. ISBN: 8022802735

Dudas, J. Selected mechanical properties of aspen wood [online]. 2008. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/293367097_Selected_mechanical_properties_of_aspen_wood

Doitrand, A., Henry, R., & Meille, S. Brittle material strength and fracture toughness estimation from four-point bending test. *Journal of Theoretical, Computational and Applied Mechanics* [online]. 2021. Dostupné z: <https://hal.science/hal-02925844v4>

Fang, C. H., Mariotti, N., Cloutier, A., Koubaa, A., & Blanchet, P. Densification of wood veneers by compression combined with heat and steam [online]. 2012. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/225618265_Densification_of_wood_veneers_by_compression_combined_with_heat_and_steam

Gaff, M., Gašparík, M. Influence of densification on bending strength of laminated beech wood [online]. 2015. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/influence-of-densification-on-bending-strength-of-laminated-beech-wood/>

Holčík, J. Výzkum adheze a koheze a jejich vlivu na vlastnosti sendvičových struktur [online]. 2014. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/28578/holcik_2014_dp.pdf

Hoadley, R. B. *Understanding Wood: A Craftsman's Guide to Wood Technology*. Taunton Press, 2000. ISBN: 9781561583584

Kaláčová, V. Netradiční použití dřeva - dřevo a oděv [online]. 2016. Dostupné z: https://theses.cz/id/7kgwon/zaverecna_prace.pdf

Kozielová, S. Studium flexibility a adheze cementových lepidel při různém stupni modifikace polymerním pojivem [online]. 2019. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=186252

Kollmann, F. F. P., & Côté, W. A. Jr. *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*. Springer-Verlag, 1968. ISBN: 3642879306.

Kulich, M. Hořlavost a výbušnost alternativních a směsných paliv [online]. 2014. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/106648/KUL010_FBI_P3908_3908V009_2014_autoreferat.pdf

Kundela, M. Dřevo – konstrukční materiál, jeho struktura a mechanické vlastnosti [online]. 2012. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52793

Laine, K., Segerholm, K., Wålinder, M., Rautkari, L., & Hughes, M. Wood densification and thermal modification: Hardness, set-recovery and micromorphology [online]. 2013. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/303357326_Wood_densification_and_thermal_modification_hardness_set-recovery_and_micromorphology

Landová, M. Vliv vlhkosti na pevnost lepeného spoje při olepení bočních ploch dílců koupelnového nábytku [online]. 2016. Dostupné z: <https://katalog.mendelu.cz/records/aee379e8-c9d4-4e2e-9a66-e201b759e4e1>

Loskot, V. Požadavky na dříví douglasky při použití ve stavbách [online]. 2016. Dostupné z: https://theses.cz/id/7c07qu/zaverecna_prace.pdf

Lichtenberg, V. Vliv nízké teploty na pevnost lepeného spoje nábytkových hran [online]. 2016. Dostupné z: https://theses.cz/id/hpcj6l/zaverecna_prace.pdf

Li, M., He, M., & Li, Z. Size effects on the bending strength of Chinese larch pine laminated veneer lumber [online]. 2023. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/368290370_Size_effects_on_the_bending_strength_of_Chinese_larch_pine_laminated_veneer_lumber

Marie, D. Dřevo jako primární médium k architektonické performanci: Případová studie v poli Systemický přístup k architektonické performanci [online]. 2018. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/75562>

Maršálek, H. Vliv teploty na pevnost lepeného spoje nábytkových hran z exotického dřeva [online]. 2017. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/zp/index.pl?podrobnosti=85119>

Monetto, I., & Massabò, R. An analytical solution for the inverted four-point bending test in orthotropic specimens [online]. 2021. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/349081846_An_analytical_solution_for_the_inverted_four-point_bending_test_in_orthotropic_specimens

Navi, P., & Heger, F. Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood [online]. 2004. Dostupné z: <https://doi.org/10.1557/mrs2004.100>

Nováková, K. Dřevo jako výjimečný materiál [online]. 2018. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/45588/novakova_2019_dp.pdf

Pelit, H., Sönmez, A., & Budakçı, M. Effects of densification temperature and some surfacing techniques on the hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [online]. 2015. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-thermomechanical-densification-and-heat-treatment-on-density-and-brinell-hardness-of-scots-pine-pinus-sylvestris-l-and-eastern-beech-fagus-orientalis-l/>

Požgaj, A. Štruktúra a vlastnosti dreva. Vyd. 1. Bratislava : Príroda, 1993. ISBN: 80-07-00600-1

Sandberg, D., Kitek Kuzman, M., & Gaff, M. Kompozitní výrobky na bázi dřeva - Dřevo jako kompozitní a konstrukční materiál [online]. 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328880618_Engineered_Wood_Products_Kompozitni_materialy_na_bazi_dreva

Stehlík, P. Vliv pojivové báze lepidla a druhu lepeného spoje na pevnost lepeného spoje masivního dřeva akátu [online]. 2017. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/zp/index.pl?podrobnosti=79920>

Vido, M. Experimentálne zistenie radiálnych modulov pružnosti jarného a letného dreva smreku obyčajného metódou DIC [online]. 2018. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/zp/index.pl?podrobnosti=79865>

Walker, J. C. F. Primary Wood Processing: Principles and Practice [online]. Springer, 2006. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/287542127_Primary_wood_processing_Principles_and_practice

Welzbacher, C. R., & Rapp, A. O. Durability of thermally modified timber from industrial-scale processes in different use classes: Results from laboratory and field tests [online]. *Wood Material Science & Engineering*, 2(4), 158-176, 2007. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/233210280_Durability_of_thermally_modified_timber_from_industrial-scale_processes_in_different_use_classes_Results_from_laboratory_and_field_tests

Ženatý, P. Posouzení kvality lepení kombinovaných masivních materiálů na bázi dřeva [online]. 2016. Dostupné z: <https://theses.cz/id/py5hgs/18151430>

14. Seznam použitých zkratek a symbolů

°C stupeň Celsia

kg.m^{-3} kilogram na metr krychlový

MPa megapascal

kN kilonewton

kPa kilopascal

m^3 metr krychlový

kg kilogram

g.m^{-3} gram na metr krychlový

mm milimetr

N Newton

ČSN česká technická norma

15. Přílohy

Priloha č.1 Výsledky

Vzorek	Hustota (kg*m-3)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul pružnosti (MPa)
1-01	747,97	60,50	2350,04
1-02	672,26	26,75	6384,21
1-03	652,99	66,01	704,54
1-04	674,21	35,17	11590,03
1-05	706,91	67,57	13881,00
1-06	782,82	58,58	17547,57
1-07	713,28	68,16	724,28
1-08	752,48	75,42	1780,83
1-09	755,18	27,43	8557,46
1-10	779,77	23,81	3723,77
2-01	810,20	37,37	2722,33
2-02	766,97	14,78	5259,71
2-03	769,98	135,30	18075,39
2-04	748,97	80,65	13007,39
2-05	713,05	33,55	12798,82
2-06	775,01	38,34	15043,79
2-07	786,40	43,31	11701,73
2-08	785,67	37,21	5169,80
2-09	715,20	64,41	13305,54
2-10	778,66	41,07	12438,72
3-01	784,52	43,59	15156,76
3-02	754,79	31,31	13595,20
3-03	699,65	61,01	12496,97
3-04	751,17	59,36	13885,50

Vzorek	Hustota (kg*m-3)	Pevnost v ohybu (MPa)	Modul pružnosti (MPa)
3-05	801,69	91,27	16165,40
3-06	795,93	95,10	13898,22
3-07	777,51	103,10	15581,30
3-08	803,48	87,50	18745,97
3-09	812,94	175,38	18927,54
3-10	797,27	187,77	15802,16
4-01	836,70	135,39	13538,39
4-02	876,95	173,27	15256,83
4-03	808,55	58,97	17572,95
4-04	820,24	70,60	17246,32
4-05	850,49	128,78	17841,64
4-06	843,35	198,32	21316,23
4-07	879,56	112,06	19335,81
4-08	850,10	207,30	19536,51
4-09	821,83	131,32	16870,76
4-10	784,76	150,70	14590,31
5-01	861,06	127,16	18075,07
5-02	939,22	234,98	21289,99
5-03	881,58	121,42	19156,80
5-04	879,02	253,42	18160,73
5-05	846,33	188,05	17365,81
5-06	847,59	229,27	14164,85
5-07	906,22	209,98	18695,84
5-08	874,91	62,33	12500,74
5-09	889,62	194,90	19430,01
5-10	905,39	201,35	18103,23