

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

Vliv delignifikace na vlastnosti průhledného dřeva

Diplomová práce

Mgr. Martin Růžička

Ing. Kateřina Hájková, Ph.D.

2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Růžička

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv delignifikace na vlastnosti průhledného dřeva

Název anglicky

Effect of delignification on the properties of transparent wood

Cíle práce

Tato práce pojednává o výrobě průhledného dřeva, při různých způsobech delignifikace. Hodnocenými faktory budou vybrané vlastnosti průhledného dřeva. Tato práce má za účel porovnat různé delignifikační postupy s zatím jedinou známou technologií, a to delignifikací pomocí hydroxidu sodného. Cílem této závěrečné práce je zjištění vybraných vlastností, zda jiné způsoby delignifikace nedosahují lepších hodnot než zatím jediná známá technologie.

Cílem této závěrečné práce je vyrobit průhledné dřevo při různých typech delignifikace. Porovnání různých metod a způsobů delignifikace v závislosti na vybraných vlastnostech s průmyslově známou delignifikací pomocí hydroxidu sodného.

Metodika

Charakteristika vstupní suroviny pomocí analýzy základních chemických komponent. Popis použitých technologií při delignifikaci dřeva. Charakteristika průhledného dřeva. Analýza vybraných vlastností u vyrobeného průhledného dřeva.

Realizace diplomové práce:

1. Zpracování literární rešerše. (březen-červen 2023).
2. Experimentální část – příprava vzorků (červenec-srpen 2023).
3. Experimentální část – vybrané vlastnosti (září-listopad 2023).
4. Statistické zpracování výsledků a jejich interpretace v textové, tabelární i grafické podobě (prosinec-únor 2024).
5. Závěr (březen 2024).

Doporučený rozsah práce

60-80

Klíčová slova

delignifikace, průhledné dřevo, epoxidová pryskyřice, buk

Doporučené zdroje informací

- Bučko, J., Šutý, L., Košík, M. 1988. Chemické spracovanie dreva. Alfa, Bratislava, 312 s.
- Košíková, B., Bučko, J. 2002. Biotechnologické a chemické spôsoby využitia rastlinnej biomasy. 1. vyd., Technická univerzita vo Zvolene, 196 s., ISBN: 80-228-1140-8.
- Li, Y.; Fu, Q.; Yang, H.; Berglund, L. 2017. Transparent wood for functional and structural applications. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 376: 20170182, 1–15.
- Rowell, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. 2. vydání, Boca Raton: CRC Press, 2012, 703 s. ISBN: 978-1-43985-380-1.
- Tappi Test Methods. Georgia: Tappi Press Atlanta, 2004. ISBN 1-930657-33-1.
- Wu, J.; Wu, Y.; Yang, F.; Tang, C.; Huang, Q.; Zhang, J. 2019. Impact of delignification on morphological, optical and mechanical properties of transparent wood, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 117, 324–331.
- Wu, Y, Zhou, J., Haung, Q.; Wang, Y.; Liang, X.; Li, J. 2020. Study on the Colorimetry Properties of Transparent Wood Prepared from Six Wood Species. ACS Omega, 5, 1782–1788.
- Zhang, J.; Koubaa, A.; Tao, Y. et al. 2022. The emerging development of transparent wood: materials, characteristics, and applications. Curr Forestry Rep.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Kateřina Hájková, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Tomáš Holeček

Elektronicky schváleno dne 10. 5. 2023

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 7. 2023

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 04. 04. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Vliv delignifikace na vlastnosti průhledného dřeva vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne _____

Poděkování

Rád bych poděkoval za vedení diplomové práce a odbornou pomoc při jejím zpracování paní Ing. Kateřině Hájkové, Ph.D., která mi poskytla potřebné informace.

Vliv delignifikace na vlastnosti průhledného dřeva

Souhrn

Diplomová práce se zaměřuje na vlastnosti průhledného dřeva, jakožto inovativního materiálu s pozoruhodným množstvím využití. Práce shrnuje poznatky o chemii dřeva, delignifikaci, možných výrobních procesech průhledného dřeva a analýze vlastností v porovnání se dřevem tak, jak ho doposud známe.

První část diplomové práce detailně popisuje základní vlastnosti a strukturu dřeva s důrazem na specifikace ligninu a jeho vlivu na celkové vlastnosti dřeva. Dále se věnuje konkrétním metodám delignifikace a jejich vlivům na výsledný materiál. V těchto metodách jsou popsány různé techniky delignifikace, včetně chemických i organických metod s porovnáním kladných a negativních aspektů jejich užití. Závěr této části diplomové práce je věnován výrobním procesům průhledného dřeva, včetně souhrnu nejnovějších poznatků a technologických inovací v této oblasti.

Experimentální část práce se věnuje výrobě a následné analýze vlastností průhledného dřeva v porovnání s vlastnostmi dřeva bukového (*Fagus sylvatica*). Pro tyto analýzy byla zvolena zkouška pevnosti v tlaku, optické vlastnosti, a to na charakterizaci bělosti, fluorescence, opacity a barevnosti. Následně je průhledné dřevo podrobena zkoušce protipožární odolnosti formou spalování a hledání kyslíkového čísla.

Na závěr práce jsou demonstrovány výsledky a poznatky měření, které jsou dále rozebírány v diskuzi.

Tato diplomová práce přispívá k hlubšímu porozumění vlastností a chování průhledného dřeva a otevírá tak cestu k jeho inovativnímu využití v různých, ať už stavebních, tak i designových oblastech.

Klíčová slova: delignifikace, průhledné dřevo, epoxidová pryskyřice, buk

Effect of delignification on the properties of transparent wood

Summary

This thesis investigates transparent wood, an innovative material with a remarkable range of potential applications. The work summarizes current knowledge on wood chemistry, delignification, potential manufacturing processes for transparent wood, and an analysis of its properties compared to conventional wood.

The first part of the thesis provides a detailed description of the basic properties and structure of wood, emphasizing the specifics of lignin and its influence on the overall properties of wood. It then focuses on specific delignification methods and their effects on the resulting material. Various delignification techniques are described, including chemical and organic methods, and their positive and negative aspects are compared. The conclusion of this part of the thesis is dedicated to the manufacturing processes of transparent wood, including a summary of the latest findings and technological innovations in this field.

The experimental part of the work focuses on the manufacturing and subsequent analysis of the properties of transparent wood compared to the properties of beech wood (*Fagus sylvatica*). The following tests were selected for this analysis: compressive strength test and optical properties, including characterization of whiteness, fluorescence, opacity, and color. Subsequently, the transparent wood was subjected to a fire resistance test in the form of combustion and determination of the oxygen index.

The final part of the thesis presents the results and findings of the measurements, which are further analyzed in the discussion.

This thesis contributes to a deeper understanding of the properties and behavior of transparent wood, opening the way for its innovative use in various fields, both in construction and design.

Keywords: delignification, transparent wood, epoxy resin, beech

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Cíl práce	11
3	Literární rešerše	12
3.1	Chemie použitého dřeva	12
3.1.1	Holocelulóza.....	13
3.1.1.1	Celulóza	13
3.1.1.2	Hemicelulózy	14
3.1.2	Lignin	14
3.1.2.1	Degradace ligninu	17
3.1.3	<i>Fangus sylvatica</i> – Buk lesní.....	17
3.2	Delignifikace	17
3.2.1	Metody založené na rozkladu celulózy	18
3.2.1.1	Sulfátová delignifikace	18
3.2.1.2	Sulfitová delignifikace	18
3.2.1.3	Alkalická delignifikace	19
3.3	Průhledné dřevo	20
3.4	Souhrn dosavadních poznatků	22
4.	Metodika	23
4.1	Materiál.....	23
4.1.1	Buk (<i>Fagus sylvatica</i>).....	23
4.1.2	Sulfátová buničina	23
4.1.3	Natronová buničina	24
4.1.4	Sulfitová buničina.....	24
4.1.5	Epoxidová pryskyřice	24
4.1.6	Zeleň.....	25
4.1.7	Tyrkys.....	26
4.2	Delignifikace	26
4.3	Výroba průhledného dřeva	27
4.4	Testování průhledného dřeva	29
4.4.1	Pevnost v tlaku	30
4.4.2	Tvrdost podle Brinella.....	30
4.4.3	Optické vlastnosti	31
4.4.4	Protipožární vlastnosti	32
4.4.5	Kyslíkové číslo	34
5.	Výsledky.....	36
5.1	Pevnost v tlaku	36

5.2	Optické vlastnosti.....	37
5.3	Protipožární vlastnosti	40
5.3.1	MARHE.....	41
5.3.2	PHRR.....	42
5.3.3	Koncentrace O ₂	43
5.3.4	Koncentrace CO ₂	44
5.3.5	Úbytek materiálu	45
5.4	Kyslíkové číslo	47
6.	Diskuze	50
6.1	Pevnost v tlaku	50
6.2	Tvrдость podle Brinella.....	50
6.3	Optické vlastnosti.....	50
6.4	Protipožární vlastnosti	51
6.5	Kyslíkové číslo	52
7.	Závěr	54
8.	Literatura.....	55
	Normy	59
	Seznam obrázků.....	60
	Samostatné přílohy	61

1 Úvod

I když je v částečném slova smyslu vzorek de faceto průhledný, nejedná se o absolutně bezbarvý materiál. Správná terminologie je tedy částečně průhledné dřevo. Pro snadnější formulaci a komunikaci se však používá pojem „průhledné dřevo“. Materiál, tedy dřevěnou šablonu je nejprve třeba připravit chemickým procesem, kde je zbaven ligninu. Delignifikaci je možno provést v různých chemikáliích a následně je materiál impregnován pomocí pryskyřice (Zhu *et al.*, 2016).

Průhledné dřevo se stává čím dál, tím více zkoumaným materiálem, a to zejména díky jeho vlastnostem, jako například propustnost světla (propustnost světla je až 40 %). Momentálně je nejvíce využíván stavebními a solárními energetickými společnostmi. Například Yuanyuan Li použila průhledné dřevo jako materiál pro stěnu domu. Materiál stěny je vyroben metodou H_2O_2 , tudíž delignifikace probíhá s pomocí peroxidu vodíku pomocí jeho páry a následuje impregnace epoxidovou pryskyřicí pro efektivnější propuštění vnějšího světla, a tak se tato budova stává mnohem příznivější pro obyvatele v každodenním životě (Li *et al.*, 2019).

Je třeba se zaměřit i na další možnosti využití tohoto průlomového materiálu, a to například v nábytkářské sféře. Doposud se veškerý výzkum soustředí na doslova průhledný, bezbarvý či materiál bez textury. Materiál tedy postrádá vizuální a hmatově přirozené vlastnosti dřeva. Pokud se však při vývoji tohoto materiálu neodstraní veškerý lignin, který nese barevnou složku ve dřevě, lze zachovat i jisté estetické prvky dokazující přírodní materiál s částečně průhlednou strukturou. Takovýto materiál znamená vysoký potenciál v celém nábytkářském odvětví. Je třeba dbát na určité parametry při volbě dřeviny. Pokud z materiálu chemickými úpravami odstraníme lignin, oslabíme tak jeho strukturu a dřevo s nízkou hustotou začne mít tendence se lámat (Wu *et al.*, 2020).

2 Cíl práce

Tato práce se zabývá výrobou průhledného dřeva, s využitím jiné metody delignifikace, než doposud využívaný postup delignifikace v hydroxidu sodném.

Hlavním cílem práce je výroba průhledného dřeva, které bylo vyrobeno z bukového dřeva dusičnано-alkalickou metodou. Kromě tohoto materiálu, bylo průhledné dřevo vyrobeno i z průmyslových vláknin. Tyto průmyslové vlákniny byly vyrobeny sulfátovou či natronovou metodou.

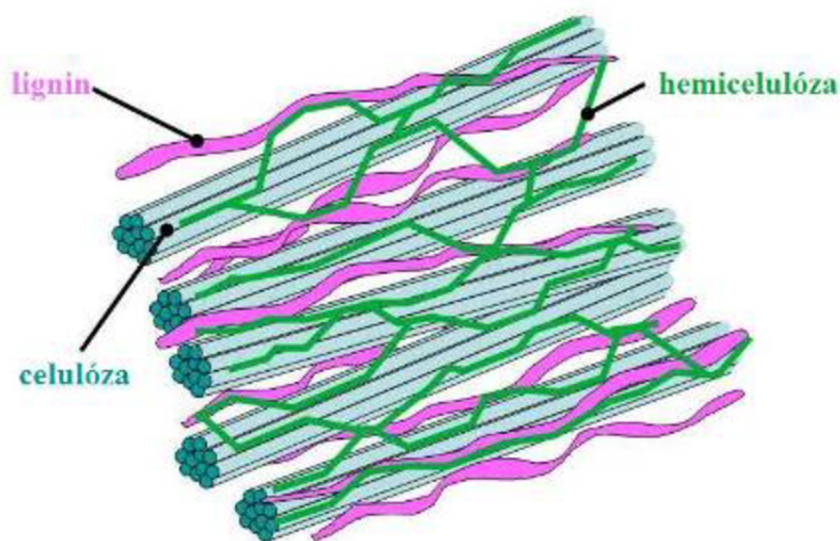
Dál byl v této práci zkoumán vliv fotoluminiscenčních barviv (tyrkys a zeleň) a jak se právě tyto barviva projeví v průhledném dřevu. Jako hlavní vyhodnocující parametry této práce byly optické vlastnosti, ale také vybrané protipožární vlastnosti.

Z optických vlastností je to bělost, bělost v UV osvětlení, fluorescence a barvové parametry L^* a^* b^* . Z protipožárních vlastností bylo vyhodnoceno spalné teplo a kyslíkové číslo. A tyto vlastnosti byly doplněny o mechanickou pevnost v tlaku.

3 Literární rešerše

3.1 Chemie použitého dřeva

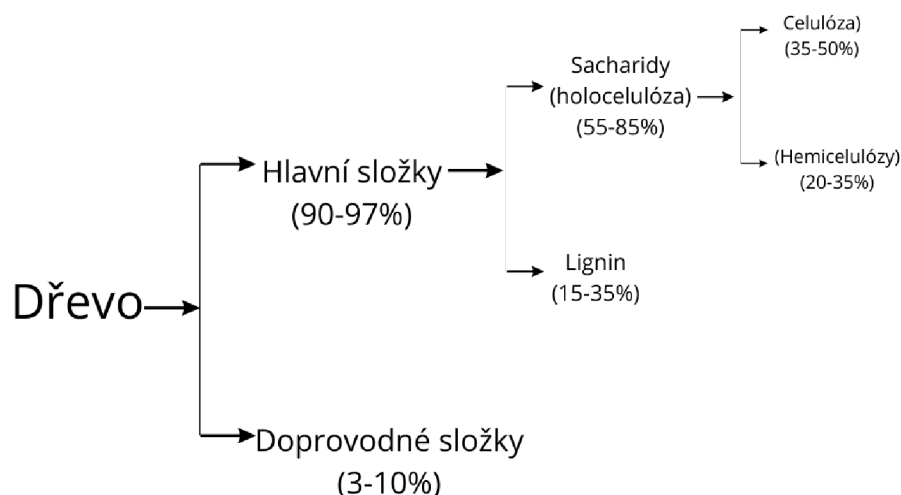
Dřevo lze chápat jako trojrozměrný materiál složený z polymerů, přičemž hlavními stavebními kameny jsou celulóza, hemicelulózy a lignin. Tyto tři polymery, které obsahují hydroxylové skupiny, se nacházejí v buněčné stěně dřeva (Wangaard, 1981).



Obrázek 1 Struktura lignocelulózy (Kim *et al.*, 2006)

Tyto tři základní složky tvoří 90–97 % celkové hmotnosti materiálu. Celulóza a hemicelulózy jsou polymerní cukry, tzv. polysacharidy, jejichž jednotky jsou spojeny glykosidickou vazbou. Lignin se však řadí mezi polyfenoly, které se vyznačují přítomností více než jedné fenolové jednotky v molekule. Zbylé 3–10 % dřeva tvoří doprovodné složky, které můžeme rozdělit na organické a anorganické látky. Doprovodné látky se ve dřevě vyskytují v různé míře a jejich skladba se u každého stromu liší. Toto specifické složení, ovlivněné oblastí růstu, ročním obdobím nebo částí stromu, má vliv na vlastnosti dřeva, jako je například barva, vůně, sušení, impregnace i na povrchovou úpravu (Kim *et al.*, 2006).

Na Obrázku 2 je graficky znázorněné procentuální zastoupení jednotlivých složek ve dřevě.



Obrázek 2 Procentuální zastoupení celulózy, hemicelulózy a ligninu (Kim et al., 2006)

3.1.1 Holocelulóza

Holocelulóza představuje specifickou frakci rostlinné buněčné stěny, která se skládá z celulózy a hemicelulóz. Cílem delignifikace, procesu odstraňování ligninu, je zachovat tyto složky v co nejvíce nezměněném stavu oproti jejich původnímu stavu ve dřevu. Ideální delignifikace by spočívala v úplném odstranění ligninu bez jakéhokoli dopadu na polysacharidy, avšak doposud neexistuje metoda, která by toto kritérium dokázala beze zbytku splnit. Izolovaná holocelulóza se hodnotí na základě tří klíčových parametrů:

- **Minimální obsah zbytkového ligninu:** Zbytkový lignin může negativně ovlivnit vlastnosti celulózy a hemicelulóz, proto je důležité ho minimalizovat.
- **Minimální ztráta polysacharidů:** Během delignifikace může docházet k rozkladu polysacharidů, a to především hemicelulóz. Je důležité minimalizovat tyto ztráty, aby se zachovala požadovaná kvalita holocelulózy
- **Minimální oxidační a hydrolytická degradace celulózy:** Oxidace a hydrolýza mohou vést k poškození celulózy a snížení jejích mechanických vlastností. Je nutné minimalizovat i tyto nežádoucí procesy (Kačík et al., 1999).

3.1.1.1 Celulóza

Celulóza, nejrozšířenější polysacharid na Zemi, hraje klíčovou roli v biosféře i lidské civilizaci. Jedná se o lineární polymer glukózy, tvořený β -D-anhydroglukopyranózovými jednotkami spojenými glykosidickou vazbou. Díky této struktuře je celulóza ve vodě nerozpustná a vykazuje vysokou mechanickou pevnost a odolnost vůči chemikáliím.

Glukopyranózové jednotky v celulóze obsahují tři volné hydroxylové skupiny, které se podílejí na tvorbě vodíkových vazeb mezi jednotlivými řetězci. Tyto vodíkové vazby dodávají celulóze její charakteristickou pevnost a odolnost. Celulóza je hlavní složkou rostlinných

buněk, kde tvoří buněčnou stěnu a dodává rostlinám strukturální pevnost. Díky svým vlastnostem je celulóza důležitou surovinou pro výrobu široké škály produktů, včetně:

- **Papíru:** Celulózová vlákna jsou základem papíru, dodávají mu pevnost a savost.
- **Textilu:** Bavlina a len, které se skládají z celulózy, se používají k výrobě textilu.
- **Biopaliva:** Celulóza se může přeměňovat na biopaliva, jako je ethanol a bioplyn.
- **Další materiály:** Celulóza se používá i v dalších materiálech, jako jsou plasty, laky a potravinářské přídatné látky (Kim *et al.*, 2006).

Kačík a Jurczyková (2020) celulózu popsali jako hojně se vyskytující biopolymer na Zemi (ročně nově vzniká $1,5 \times 10^9$ tun), který tvoří základní kostru buněčných stěn dřevnatých rostlin. Jedná se o lineární řetězec glukózových jednotek pevně spojených glykosidickými vazbami. Tyto řetězce se dále sdružují do mikrovláken a primárního stěnového materiálu. Dřevo si buduje celulózu procesem zvaným biosyntéza celulózy, probíhající uvnitř buněk stromu. Začíná fixací oxidu uhličitého ze vzduchu do glukózy v procesu fotosyntézy. Glukóza se pak transportuje do buněčné stěny a začleňuje se do rostoucího řetězce celulózy za pomoci řady chemických reakcí. Klíčovým enzymem pro biosyntézu celulózy je celulózová syntáza. Katalyzuje tvorbu glykosidické vazby mezi dvěma molekulami glukózy, čímž vzniká krátký řetězec zvaný celobióza. Tyto řetězce se pak uspořádají vedle sebe a spojí do lineárního řetězce celulózy. Biosyntéza celulózy je komplexní proces zahrnující mnoho kroků a enzymů. Celulózové řetězce se navíc váží na další látky v buněčné stěně, jako jsou hemicelulózy a lignin. Celulóza se v živých rostlinných buňkách neustále vytváří, pokud rostlina má k dispozici potřebné látky. V dřevě se pak celulóza s časem kumuluje a vede k tvorbě dřevních vláken. Celulóza je ve vodě nerozpustná, čímž se liší od jiných polysacharidů. Tato vlastnost, spolu s její pevností a odolností, z ní dělá ideální materiál pro konstrukci rostlinných buněk. Celulóza má také široké spektrum dalších využití, od výroby papíru a textilu až po biopaliva a biomateriály (Kačík & Jurczyková, 2020).

3.1.1.2 Hemicelulózy

Hemicelulózy, souhrnný název pro pestrú skupinu polysacharidů, se nachází v buněčné stěně rostlin po boku celulózy. Zatímco celulóza se pyšní krystalickou strukturou a lineárními řetězci glukózy, hemicelulózy jsou větvené a amorfni. Její složitá struktura zahrnuje různé druhy cukrů, jako jsou například: hexózy (manóza a galaktóza), pentózy (xylóza a arabinóza), oxidované formy cukrů (kyselina glukuronová a kyselina galakturonová) a acetylované cukry. Díky této rozmanitosti hemicelulózy zpevňují buněčnou stěnu (pomáhají celulóze vytvářet pevnou a odolnou síť, která chrání rostlinné buňky), zajišťují hydrataci (díky hydrofilním vlastnostem hemicelulózy absorbují vodu a udržují buňky hydratované) a podílí se na transportu látek (Jeffries, 1983).

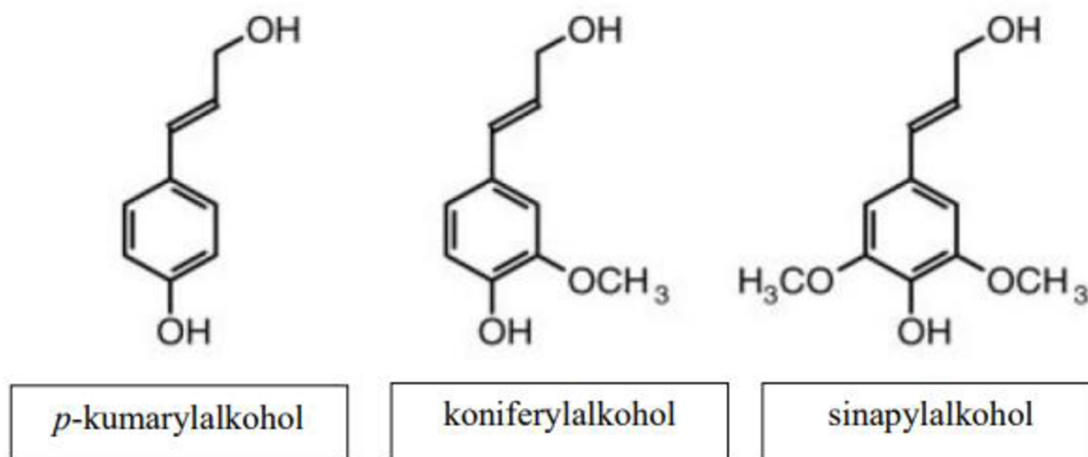
3.1.2 Lignin

Termín "lignin" byl poprvé použit v roce 1819 švédským botanikem A. P. Candollem. Pojmenování vychází z latinského slova "lignum", které jednoduše znamená "dřevo". Candolle

tak poukázal na základní charakteristiku této biomolekuly, jelikož se jedná o klíčovou složku dřevní hmoty (Bajpai, 2017).

Lignin se ve dřevě tvoří radikálovou polymerizací tří alkoholů: p-kumarylalkoholu, koniferylalkoholu a sinapylalkoholu. Poměr těchto prekurzorů se mění podle druhu rostliny a jejího stáří.

Obsah ligninu ve dřevě se pohybuje mezi 15 a 38 %. S věkem stromu se jeho množství zvyšuje, stejně jako obsah methoxylových skupin. Jehličnany obsahují více ligninu (25–36 %) než listnaté stromy (15–25 %). Starší dřeviny obsahují více ligninu, čímž se zvyšuje jejich mechanická pevnost a snižuje propustnost vody a živin obecně. Lignin se nachází především v mezibuněčné hmotě střední lamely (60–90 %), ale proniká i do dalších vrstev buněčné stěny. Obklopuje polysacharidy a je s nimi chemicky spojen. Lignin dodává dřevu pevnost tím, že spojuje jednotlivá vlákna do kompaktního celku (Vanholme *et al.*, 2010).



Obrázek 3 Ligninové alkoholy (p-kumarylalkohol, koniferylalkohol a sinapylalkohol) (Vanholme *et al.*, 2010)

Požgaj popsal lignin jako rozvětvený amorfní polymer, který tvoří důležitou součást rostlinných buněčných stěn a úzce navazuje na vlastnosti celulózy a hemicelulózy. Působí jako lepidlo, které dodává dřevu tuhost a chrání celulózový materiál před rozkladem. Nachází se mezi buňkami i uvnitř nich a má o něco větší výhřevnost než celulóza. Na rozdíl od ní a hemicelulóz, není lignin tvořen ze sacharidů, ale z aromatických alkoholů, díky nimž je hydrofóbní a odolný vůči chemickému napadení (Požgaj, 1997).

Červenka popsal lignin jako komplexní makromolekulu s trojrozměrnou strukturou, tvořenou benzenovými jádry s hydroxylovými a methoxylovými skupinami. Kromě zvyšování odolnosti, pevnosti a tvrdosti dřeva plní lignin také funkci vyplňující a tmelící. Vyplňuje mezery mezi celulózou a hemicelulózami a díky svému termoplastickému charakteru tmelí vláknitou strukturu dřeva. Listnaté stromy, které obsahují více ligninu, se po jeho zahřátí vyznačují větší elasticitou a tvárností. Příkladem je buk, dřevo s obzvláště vysokým obsahem ligninu, které se hojně používá na výrobu ohýbaného nábytku (Červenka *et al.*, 1980).

Lignin hraje ve dřevě klíčovou roli tím, že poskytuje mechanickou stabilitu buňkám a tkáním, zabraňuje rozkladu celulózy a hemicelulóz, podílí se na transportu vody a živin a chrání dřevo před patogeny a UV zářením (Ma *et al.*, 2013).

Po extrakci a úpravě se získává látka s charakteristickou hnědou barvou, buď v tekutém, nebo sušeném stavu připomínajícím aromatický prášek. Tato biomolekula nachází široké spektrum využití v nejrůznějších oblastech lidské činnosti (Schneiderová, 2004).

Získávání ligninu se provádí pomocí rozmanitých metod. Nejčastěji se izoluje z odpadních produktů, které vznikají při výrobě buničiny. Ta se běžně produkuje tzv. *Kraft* procesem, čili sulfátovým rozvolňováním. Dřevěné štěpky se v tomto procesu ošetřují horkou vodou, hydroxidem sodným a sulfidem sodným. Alternativu představuje sulfitový proces, kde dřevo reaguje s oxidem siřičitým a dalšími látkami za zvýšené teploty (Chung & Washburn, 2013).

Je zapotřebí také zmínit i natronový proces, Organosolv proces neboli rozpouštění biomasy v hydroxidu či kyselině peroxyoctové. V natronovém procesu se dřevo vaří v roztoku hydroxidu sodném (NaOH) při teplotě okolo 170 °C. Hydroxid sodný reaguje s ligninem a štěpí jeho strukturu, čímž se uvolňují buničinná vlákna (Kocman, 2011).

V závislosti na zvolené metodě se liší vlastnosti získávaného ligninu. Jedná se o jeho molekulovou hmotnost, koncentraci funkčních skupin a čistotu. Během procesu izolace dochází k narušení vazeb mezi ligninem a sacharidy v důsledku chemických a tepelných úprav, nebo vysokého tlaku. Různé výrobní podmínky tak vedou k rozmanitým vlastnostem konečného produktu (Chung & Washburn, 2013).

Díky svým vlastnostem a rozmanitému využití je lignin cennou surovinou. Jeho deriváty se používají jako antioxidanty v plastech, potravinách, léčivech a kosmetice. Lignin se dále využívá v biopalivech a biomateriálech (Rabek, 1990).

Tabulka 1 Zastoupení ligninu, hemicelulózy, celulózy v různých rostlinách v % (Rabek, 1990)

Zdroj	Lignin (%)	Hemicelulózy (%)	Celulóza (%)
Jehličnaté dřevo	25–31	25–29	40–44
Listnaté dřevo	16–24	25–35	43–47
Juta	13	14	71
Konopí	6	22	70
Len	3	12	63
Bavlna	1	2	95

3.1.2.1 Degradace ligninu

Lignin se odlišuje od celulózy a hemicelulózy značnou odolností vůči degradaci. Tato vlastnost představuje jak výzvu, tak i příležitost pro různé oblasti (Bungay, 1992).

Schopnost rozkládat lignin, komplexní polymer v buněčných stěnách rostlin, byla předmětem zájmu vědců již delší dobu. Dřevokazné houby se ukázaly jako velice efektivní v degradaci ligninu, avšak pozdější výzkumy ukázaly, že i některé bakterie disponují touto schopností. I když bakteriální degradace ligninu není tak komplexní a rozsáhlá, jako degradace prováděná houbami, bylo prokázáno, že lignolytické bakterie dokáží rozkládat lignin na menší aromatické molekuly. Tyto molekuly jsou následně katabolizovány v buňce bakterií (Burlage, 1989).

3.1.3 *Fangus sylvatica* – Buk lesní

Buk lesní, též nazývaný *Fangus sylvatica*, je roztroušeně pórovitá dřevina s charakteristickou narůžovělou až červenohnědou barvou. U starých stromů se můžeme setkat s nepravým jádrem a relativně zřetelnými letokruhy. Mezi přednosti bukového dřeva patří jeho solidní výhřevnost ($4,2 \text{ kW} \cdot \text{kg}^{-1}$), avšak jeho hlavními nevýhodami jsou menší trvanlivost a nízká odolnost vůči biotickým faktorům, jako jsou houby a hmyz (Wagenführ, 2002).

Bukové dřevě se vyznačuje hustotou $680 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ při 0% vlhkosti a $720 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ při 12% vlhkosti. V podélném směru vykazuje tvrdost 72 MPa a pevnost v tlaku podél vláken 62 MPa při 12% vlhkosti. Modul pružnosti v podélném směru se pohybuje mezi 10 000 a 16 000 MPa, opět při 12% vlhkosti (Perelygin, 1965).

Podíl celulózy v bukovém dřevě je 33,7–46,4 %, hemicelulóz 17,8–25,5 % a podíl ligninu je 11,6–22,7 % (Wagenführ, 2002).

3.2 Delignifikace

Jak bylo již výše zmíněno, získávání či extrakce ligninu z dřevní hmoty lze dosáhnout několika způsoby. Nedostatky v metodách izolace ligninu představují značnou překážku v pochopení struktury tohoto komplexního materiálu. Důvodem je jeho mimořádná citlivost na chemické a fyzikální vlivy, které vedou k jeho modifikaci během procesu izolace. Původní forma ligninu ve dřevě se označuje jako protolignin. Pro izolaci ligninu existuje několik postupů, které lze rozdělit do dvou kategorií:

- **Metody založené na rozkladu celulózy:**

- Chemické metody: V tomto přístupu se chemické látky používají k rozrušení a odstranění celulózy a dalších složek dřeva, zatímco lignin zůstává jako nerozpustný zbytek. Mezi běžné chemické látky používané v tomto procesu patří hydroxid sodný, kyselina sírová a dioxan.
- Fyzikální metody: Tyto metody využívají fyzikální síly, jako je mletí a tlak, k rozrušení lignocelulózového komplexu a oddělení ligninu (Kačík *et al.*, 1999).

- **Metody rozpouštění ligninu:**

- Organická rozpouštědla: Lignin se rozpouští v organických rozpouštědlech, jako je dioxan, ethanol a aceton.
- Solvolytické metody (rozpouštění a štěpení): V tomto přístupu se lignin štěpí na menší fragmenty, které se pak rozpouštějí v rozpouštědle (Kačík *et al.*, 1999).

Vzhledem k zaměření této diplomové práce se dále budeme podrobněji věnovat metodě založené na rozkladu celulózy, konkrétně tedy chemickým metodám (Geffert, 2015).

3.2.1 Metody založené na rozkladu celulózy

3.2.1.1 Sulfátová delignifikace

Sulfátový proces, též nazývaný kraft proces, dominuje celosvětové produkci buničiny. Jeho popularita pramení z výjimečných vlastností, které dodává buničině: vysoká pevnost a bělost, univerzálnost pro různé druhy dřeva a efektivní regenerace chemikálií, čímž snižuje náklady a dopady na životní prostředí (Zemanová, 2008).

Základem procesu jsou dřevěné štěpky a voda, obohacené o várkové a bělicí chemikálie. Vysoká teplota a chemické látky (hydroxid a sulfid sodný) rozpouštějí lignin a hemicelulózy, čímž uvolňují celulózová vlákna. Klíčovým krokem před vařením je impregnace, která zajišťuje rovnoměrné rozložení aktivních chemikálií na dřevní štěpky. Po impregnaci se teplota zvýší a začíná fáze vaření, trvající 1 až 4 hodiny v závislosti na požadovaném stupni delignifikace (Gustavsson *et al.*, 1999).

Sulfátová buničina se potýká s problematikou silně zapáchajících sloučenin uvolňovaných během procesu, které představují environmentální hrozbu. Řešení problematiky zápachu a dalších environmentálních aspektů je klíčové pro udržitelný rozvoj této metody. Kraft proces umožňuje efektivní produkci buničiny a zároveň vytváří lignin s širokou škálou využití. Získaný lignin se nazývá sulfátový nebo kraft lignin a má nižší molekulovou hmotnost oproti původnímu ligninu ve dřevě (Calvo-Flores *et al.*, 2015; Martín-Sampedro *et al.*, 2019).

Sulfátový proces je komplexní metoda s mnoha výhodami i nevýhodami. Jeho dominantní postavení v produkci buničiny je dáno jeho efektivitou a univerzálností. Řešení environmentálních aspektů a další inovace v procesu jsou klíčové pro jeho udržitelný rozvoj a zajištění jeho trvalé dominance v produkci buničiny (Xia *et al.*, 2019b).

3.2.1.2 Sulfitová delignifikace

Sulfitový proces, kdysi dominantní metoda výroby buničiny, čelí v posledních letech klesajícímu trendu. Jeho podíl na světové produkci se smršknul na pouhých 10 % a ustoupil do pozadí za sulfátovou metodou. Není vnímán jako přímá konkurence, ale spíše jako specifický nástroj pro specifické úkoly v papírenském průmyslu.

Za sulfitovým procesem stojí chemická reakce oxidu siřičitého a báze (vápník, hořčík, sodík, amoniak). Volba báze ovlivňuje technologické postupy, regeneraci chemikálií a energetickou náročnost, včetně spotřeby vody. Klasická varianta s kyselým pH (1–2)

a siřičitanem hořečnatým ustupuje novější verzi s hořečnatou bází a pH 3–5, která dodává buničině lepší mechanické vlastnosti (Zemanová, 2008).

Cesta sulfitové buničiny začíná na lince vláken, kde se dřevo (stejně jako u sulfátového procesu) připravuje a štěpky se vaří pod tlakem a zvýšenou teplotou v roztoku siřičitanu sodného a kyselého siřičitanu hořečnatého. Následuje zpracování buničiny v expanzní nádrži, bubnových pračkách/šnekových lisech a tlakové třídění/čištění ve vířivých hydrocyklónech. Po uvaření a regeneraci chemikálií se buničina bělí kyslíkovou delignifikací a bělením v jednom/dvou stupních (kyslík, peroxid vodíku, oxid siřičitý), načež se rozředí vodou a dále pere. Sulfitový proces je v některých ohledech tedy kvalitnější volbou oproti sulfátovému procesu, a to vyšší bělostí buničiny, nižším obsahem dřevních zbytků a lepší pevností v tahu. Dokáže si poradit i s méně kvalitním dřevem. Na druhou stranu mezi jeho negativní vlastnosti patří horší pevnost, výtěžnost buničiny a zatěžuje životní prostředí znečišťováním ovzduší a vody a korozi zařízení.

Sulfitový proces i přes klesající popularitu stále drží své místo v portfoliu výrobních technologií. Jeho specifické vlastnosti ho předurčují pro specifické využití v papírenském průmyslu, a i v budoucnu bude hrát důležitou roli v produkci speciálních druhů buničiny (Calvo-Flores *et al.*, 2015).

3.2.1.3 Alkalická delignifikace

Alkalický, natronový proces, je historicky významná metoda výroby buničiny ze dřeva. Jeho kořeny sahají do roku 1853, kdy Burgess a Watt patentovali inovativní metodu alkalického rozkladu dřeva za tlaku a zvýšené teploty. Samotný proces spočívá ve vaření dřevěných štěpků v roztoku hydroxidu sodného (NaOH) při teplotě okolo 160 °C. NaOH chemicky reaguje s ligninem, čímž ho rozpouští a umožňuje oddělení celulózových vláken. Natronový proces se v mnoha ohledech podobá kraftovému rozvláknování, avšak s absencí Na_2S . Pro optimalizaci účinnosti se do roztoku může přidávat jako katalyzátor antrachinon (AQ) (Lapierre *et al.*, 2000).

Mezi hlavní přednosti natronového procesu patří jeho jednoduchost a relativně nízká cena. Díky tomu je vhodný pro zpracování jak dřeva, tak i jednoletých rostlin. Na druhou stranu je nutné zmínit i jeho nevýhody, mezi které se řadí nižší výtěžnost buničiny, ve srovnání se sulfátovým procesem, žlutá až hnědá barva získané buničiny, nutící další bělení a produkce většího množství látek, znečišťující odpadní vody). Využití natronového procesu nacházíme v papírenském průmyslu pro výrobu lepenky a novinového papíru, dále v produkci biopaliv a v oblasti výroby chemických produktů z ligninu. I když jeho význam v posledních letech klesá, s rozvojem technologií pro využití ligninu se může v budoucnu natronový proces opět stát využívanější metodou. Buničina z natronového procesu má nižší pevnost, ve srovnání s buničinou z jiných chemických procesů (sulfitový a sulfátový proces) (Siemens *et al.*, 1969; Kurt & Bittner, 2006).

Tabulka 2 Základní chemické postupy výroby buničín (Kačík a Tribulová, 2020)

Postup	Účinné chemikálie	Suroviny
Chemický postup		
Kyselý sulfitový	$\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	smrk vhodné listnáče
Kyselý sulfitový s rozpustnou zásadou	$\text{NaHSO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ $\text{NH}_4\text{HSO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	smrk vhodné listnáče
Alkalický sulfitový	$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{NaOH}$	jednoleté rostliny rýžová sláma
Natronový	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$	smrk, borovice pšeničná sláma
Sulfátový	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$	jehličnany a listnáče jednoleté rostliny
Polochemický postup		
Neutrálně sulfitový	$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3$	listnáče a jehličnany
Polokyselý sulfitový	NaHSO_3 $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$	listnáče a jehličnany

3.3 Průhledné dřevo

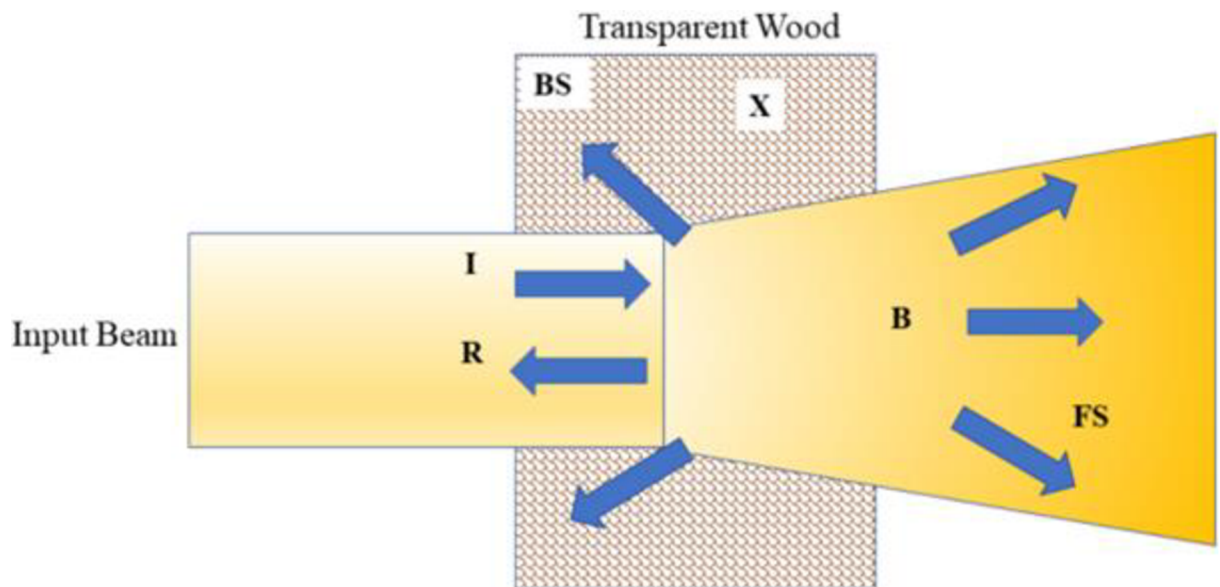
Dřevo, jakožto biologický materiál, hraje klíčovou roli v lidské civilizaci již od pradávna. Jeho široké spektrum vlastností a estetická hodnota z něj činí materiál s mnoha možnostmi využití. Avšak rostoucí poptávka po dřevě vyvolává otázky ohledně udržitelnosti a dostupnosti tohoto materiálu. V reakci na tuto výzvu se lidstvo obrací k hledání alternativních řešení, která by uspokojila naše potřeby a zároveň chránila lesní ekosystémy. Nedostatek surovin a rostoucí tlak na udržitelnost lesních ekosystémů zpochybnily tradiční využívání přírodního dřeva. V reakci na tyto výzvy se zrodily dřevěné kompozity, inovativní materiály, které v sobě snoubí to nejlepší z přírodních i syntetických materiálů. Dřevěné kompozity se pyšní širokou škálou využití a nabízejí řadu benefitů, které je předurčují k tomu, aby se staly klíčovými materiály budoucnosti. (Nepal *et al.*, 2021; Chaturri *et al.*, 2023).

Mezi dřevěnými polymerními kompozity vyniká průhledné dřevo, jako inovativní materiál s nevšedními vlastnostmi. Jeho jedinečná optická charakteristika, která umožňuje průchod světla, otevírá dveře k široké škále inovativních aplikací. Průhledné dřevo v sobě spojuje fyzikální vlastnosti klasického dřeva s částečnou propustností světla, čímž posouvá hranice designu a funkčnosti (Zhou *et al.*, 2022).

Když paprsky světla procházejí vzduchem a narazí na pevný předmět, jejich dráha se následně může ubírat hned několika směry. Světlo se může šířit dále v dopředném směru, a to buď lomem, nebo absorpcí v materiálu. Další možností je odraz světla zpět. Dřevo se vyznačuje neprůhledností, které pramení z jeho komplexní optické struktury. Mikroporézní charakter, rozmanité chemické složky buněčné stěny s odlišnými indexy lomu a přítomnost látek silně

absorbující světlo. To vše hraje klíčovou roli v tomto jevu. Pochopení principů neprůhlednosti dřeva umožňuje hlouběji proniknout do tohoto materiálu a jeho využití (Zhu *et al.*, 2013).

V běžném dřevě se světlo rozptyluje v důsledku nesouladu indexu lomu mezi pórovitostí, lumenem a buněčnou stěnou, čímž je dřevo neprůhledné. Delignifikace snižuje rozptyl světla a umožňuje průchod většího množství světla, čímž se dřevo stává transparentním (Li *et al.*, 2016).



Obrázek 4 Schematický náčrt znázorňující chování světla skrz průhledné dřevo v rámci vstupního paprsku o intenzitě dopadajícího I: X – absorpce, R – odraz, BS – zpětný rozptyl, FS – dopředný rozptyl, B – paprsek zachovává svůj původní směr bez výrazného rozptylu (Chutturi *et. al.*, 2023)

Průhledné dřevo v posledních letech sklízí značnou pozornost a stává se předmětem intenzivního výzkumu, a to primárně díky propustnosti světla. Většina experimentů se zaměřuje na využití průhledného dřeva v oblasti elektronických zařízení, optiky, energeticky úsporných budov a dalších. Například Li *et al.* (2016) ve své studii použili 2–5 cm silný průhledný dřevěný kompozitní materiál s propustností světla 40 % jako materiál stěn domu. Výsledky ukázaly, že průhledné dřevěné stěny dokázaly snížit spotřebu energie na osvětlení o 20 % a zároveň zajistit příjemné vnitřní prostředí s dostatkem přirozeného světla (Li *et al.*, 2016).

Avšak zlepšení propustnosti světla již není jediným cílem. Stále více se dbá na funkčnost průhledného dřeva a jeho specifické oblasti použití. V současnosti má většina průhledného dřeva vlastnosti, podobné sklu – jsou bezbarvé a bez textury, postrádají tak vizuální a hmatové vlastnosti běžného dřeva. Pokud ale dřevo zachovává určitou míru propustnosti světla a zároveň si ponechává většinu své přirozené barvy a struktury, otevírá se tak cesta k využití v interiérovém designu jako vysoce funkčnímu dekorativnímu materiálu (Xu *et al.*, 2020).

3.4 Souhrn dosavadních poznatků

Xia *et al.* (2021a) a Xia *et al.* (2021b) použili k výrobě průhledného dřeva peroxid vodíku k delignifikaci a jako aditivum epoxid a ve své práci se zaměřili na propustnost, pevnost v tahu a houževnatost průhledného dřeva.

Obdobně i Montanari *et al.* (2021) využili k delignifikace hydroxid sodný, avšak místo epoxid byl použit polyakrylát. Autoři v tomto případě využili dýhy olše, břízy a buku, jejich cílem bylo zjištění chemického složení monosacharidů, propustnost průhledného dřeva, ale také tepelná stabilita pomocí termogravimetrické analýzy a dynamické termomechanické analýzy.

Kolorimetrickými vlastnostmi u šesti druhů dřevin (bříza, jedle čínská, lípa, borovice novozélandská, oguman a černý ořech) se zabývali Wu *et al.* (2020), kteří pro výrobu použili nejprve ošetření ethanolem, po kterém následovala delignifikace hydroxid sodným a jako pryskyřice byl použit methylnmethakrylát. Kolorimetrické vlastnosti stanovili jako $L^*a^*b^*$ hodnoty, propustnost světla, kromě těchto vlastností autoři stanovili i pevnost v tahu či infračervená spektra.

Hydroxid sodný v kombinaci s peroxidem vodíku, křemičitanem sodným, síranem hořečnatým a DTPA (kyselina diethylentriaminpentaoctová) na balzové dřevo použili i Samanta *et al.* (2021), kdy nejprve dřevo bylo předupraveno pomocí acetonu a ethanolu. Tyto vzorky byly obohaceny i o termochromní či fotochromní pigmenty ve formě mikrokapslí. V případě termochromního pigmentu se pigment změnil z černého na bezbarvá a u fotochromního pigmentu z bílého na fialový odstín při vystavení slunečnímu záření. Pigmenty umožnily snížení propustnosti o 11–77 % při vystavení UV záření a zároveň termochromní pigmenty vykazovaly zvýšení modulu pevnosti v tahu o 64 % v porovnání s při použití samotného nativního thiolenového polymeru.

Mi *et al.* (2020) využili pro douglasku jako delignifikační činidlo chloritan sodný, avšak v tomto případě delignifikace probíhala u celého bloku dřeva a poté následovalo ošetření epoxidem. Autoři pak dále zkoumali, jak se mění mikroskopické hledisko oproti referenčnímu neupravenému vzorku dřeva, dále dosáhli pevnosti v tahu u průhledného dřeva 91,95 MPa, což je výrazné zvýšení oproti neošetřenému vzorku douglasky, která dosahovala pouze 21,56 MPa. Autoři navazovali na svůj předešlý výzkum, kdy místo epoxidu využili PVA (polyvinylalkohol) Mi *et al.* (2019), kde byla zkoumána hlavně houževnatost. Z těchto výzkumů je zřejmé, že průhledného dřeva s polyvinylalkoholem má jednak vyšší houževnatost, tak i pevnost v tahu oproti použití průhledného dřeva vyrobeného pomocí epoxidu.

Chloritan sodný v kombinaci polymethylmethakrylátem na dýhu břízy využili Jungstedt *et al.* (2020), kteří se zabývali chemickým složením, které v případě ligninu kleslo z 19,8 % na 2,8 %.

Na základě těchto poznatků byl právě využit jiný postup pro získání průhledného dřeva, a výsledné průhledné dřevo bylo porovnáno z hlediska optických a protipožárních vlastností.

4. Metodika

4.1 Materiál

4.1.1 Buk (*Fagus sylvatica*)

Bukové dřevo je hygroskopické, tzn., že reaguje na změny vlhkosti vzduchu. Při změnách vlhkosti se může měnit jeho rozměr a tvar. Proto je důležité, aby bylo bukové dřevo správně skladováno a ošetřováno. Mezi hlavní výhody bukového dřeva patří vysoká pevnost a tvrdost, kvalitní odolnost a opracovatelnost a estetický vzhled. Bukové dřevo je však náchylné, k napadení houbami a dřevokazným hmyzem (Holan *et al.*, 2006).

Bukové dřevo se hodí pro výrobu schodů, parket, obkladů stěn a stropů, dřevěných hraček, kuchyňského náčiní a sportovních potřeb. Díky své odolnosti proti opotřebení se používá i na výrobu koleček a rukojetí nástrojů. V neposlední řadě je buk oblíbeným materiálem pro výrobu hudebních nástrojů, jako jsou housle, kytary a bicí (Wagenführ, 2002).

Tabulka 3 Vlastnosti bukového dřeva (Wagenführ, 2002)

Hustota	650–750	kg/m ³
Pevnost v tlaku	60–80	MPa
Pevnost v tahu	100–120	MPa
Modul pružnosti	10–12	GPa
Tepelná vodivost	0,15–0,20	W/mK

Pro tuto diplomovou práci byl vybrán tento materiál z důvodu jeho vysoké dostupnosti v poměru k jeho pořizovací ceně. Dále díky jeho vlastnostem, co se týče pevnosti a odolnosti.

4.1.2 Sulfátová buničina

Sulfátová buničina, získávaná sulfátovým procesem, se vyznačuje vysokou pevností a odolností. Díky těmto vlastnostem je ideálním materiálem pro výrobu průhledného dřeva.

Výroba průhledného dřeva ze sulfátové buničiny zahrnuje několik kroků: infiltraci polymeru a následné sušení.

Sulfátová buničina má pro výrobu průhledného dřeva hned několik výhod. Je hojně dostupná a relativně levná, což je důležité pro možnou průmyslovou výrobu. Díky svým vlastnostem zajišťuje průhlednému dřevu dobré mechanické vlastnosti a udržitelnost, jelikož se jedná o obnovitelný materiál.

Pro naše měření byla použita sulfátová buničina ze směsi jehličnanů (smrk a borovice) uvařená na Kappa číslo cca 25 firmou Mondi Štětí.

4.1.3 Natronová buničina

Natronová buničina, též nazývaná soda buničina, otevírá dveře k ekologické výrobě průhledného dřeva. Její získání je daleko šetrnější a s nižší produkcí emisí, ve srovnání s běžnou sulfátovou buničinou. I když má nižší pevnost a odolnost, umožňuje nalezení optimálního materiálu pro různé aplikace. Výroba průhledného dřeva z tohoto typu buničiny zahrnuje přípravu buničiny, infiltraci polymeru a sušení, tak jak je tomu u buničiny sulfátové. Natronová buničina přináší specifické výhody: ekologická šetrnost, dostupnost obnovitelného materiálu a unikátní vlastnosti, jako je například lepší odolnost proti vlhkosti. Výzkum s využitím obou typů buničiny povede k hlubšímu pochopení vlastností průhledného dřeva.

Natronová buničina použitá pro výrobu průhledného dřeva byla dodaná firmou Delfort Group, a konkrétně se jednalo u lněnou buničinu uvařenou na stupeň delignifikace 19,9.

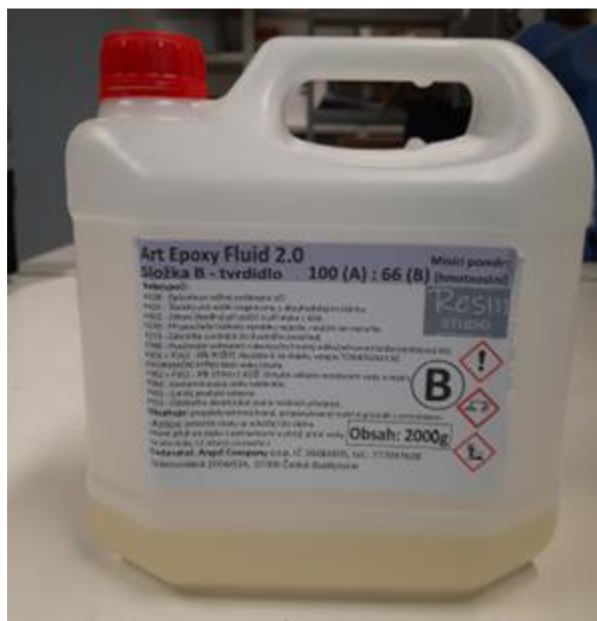
4.1.4 Sulfitová buničina

Pro srovnání s alkalickou buničinou, ať už sulfátovou nebo natronovou sloužila buničina kyselá (sulfitová), konkrétně pro analýzy byla použita smrková uvařená na stupeň odvaření 17,1. Tato buničina byla použita pro srovnání, jak půjde vyrobit pryskyřice z materiálu, který byl vařen v kyselém prostředí a stále se z něj okyseluje jeho okolí.

4.1.5 Epoxidová pryskyřice

V oblasti kreativní tvorby se stále více prosazuje epoxidová pryskyřice, která vyniká řadou předností. Její fascinující transparentnost umožňuje vytvářet úchvatné efekty s barvami a pigmenty, jež se v ní prolínají a vytvářejí jedinečné vzory. Zároveň chrání výtvořiny před degradací slunečním zářením, čímž zajišťuje jejich dlouhodobou stálost a estetickou hodnotu. Pryskyřice se vyznačuje pevným, hladkým a lesklým povrchem odolným proti vlhkosti, čímž se stává ideálním materiálem pro výrobu šperků, dekorací, obrazů a dalších předmětů. Pryskyřici lze odlévat do silikonových forem v tenkých vrstvách i silnějších odlitcích s vrstvením. Její bezpečnost pro styk s potravinami umožňuje i výrobu kuchyňských doplňků, jako jsou misky, prkénka a stolní desky. I přes nevýhody, jako je vyšší cena, doba vytvrzování a nutnost vrstvení u silnějších odlitků, se epoxidová pryskyřice stává často voleným materiálem v různých odvětvích (*Resinstudio*, 2024).

Epoxidová pryskyřice (Art Epoxy fluid 2.0) po vytvrzení vytváří plně transparentní, pevný a zrcadlově lesklý povrch. Vhodná je i pro barvené odlitky. Doba zpracovatelnosti je 40–50 minut (200 g, 23 °C) a doba vytvrzení 24–36 hodin (v závislosti na teplotě prostředí a množství odlévaného materiálu). Pryskyřice je samonivelační a tekutá, bez rozpouštědel a fenolických látek, s prakticky nulovým zápachem. Lze ji použít pro zalévání všech typů materiálů (dřevo, beton, sklo apod.). Viskozita pryskyřice je cca 700–800 mPa/s a tvrdidla 250–300 mPa/s (*Resinstudio*, 2024). Poměr míchání obou látek A a B činí 100:66.



Obrázek 5 Art Epoxy Fluid 2.0

4.1.6 Zeleně

V této diplomové práci se zabýváme využitím fotoluminiscenčního pigmentu, tzv. svítícího prášku na bázi hlinitanu, pro modifikaci epoxidové pryskyřice a dosažení luminiscenčního efektu. Díky tomuto pigmentu je pryskyřice schopna absorbovat světlo během dne a uvolňovat ho v noci, čímž vytváří světelný efekt. Tato vlastnost umožňuje tvorbu originálních svítících předmětů, jako jsou dekorace, šperky, obrazy a další. Vybrané fotoluminiscenční pigmenty se vyznačují dlouhou dobou svícení, která se pohybuje až okolo 12 hodin. To zaručuje trvalý a efektní luminiscenční efekt po celou noc (Resinstudio, 2024).



Obrázek 7 Fotoluminiscenční práškový pigment – zeleně (Resinstudio, 2024)

4.1.7 Tyrkys

Kromě zeleného fotoluminiscenčního pigmentu jsme se pro rozšíření palety barevných variant rozhodli i pro implementaci tyrkysového fotoluminiscenčního pigmentu, který je rovněž založen na bázi hlinitanu. Tyrkysová barva nabízí specifický odstín modrozelené, který v kombinaci s luminiscenčním efektem dodá elegantní vzhled.



Obrázek 6 Fotoluminiscenční práškový pigment – tyrkys (Resinstudio, 2024)

4.2 Delignifikace

Delignifikace je proces odstraňování ligninu z lignocelulózových materiálů. Jeho odstranění je nezbytné pro výrobu průhledného dřeva. Pro tuto diplomovou práci byl použit dusičnato-alkalický způsob (Milichovský *et al.*, 1979; Hájková *et al.*, 2021), kvůli jeho efektivitě a univerzálnosti využití na různé druhy dřeva.

Nejprve bylo důležité provést delignifikaci bukového masivního dřeva a analyzovat vliv délky varu a použité chemikálie na kvalitu rozvlákněného materiálu.

Delignifikace probíhala v několika krocích:

Dřevo se nejprve vařilo pomocí topného hnízda a varné a destilační baňky v 6% roztoku kyseliny dusičné po dobu 45 minut (první várka) a 90 minut (druhá várka). Po varu v kyselině dusičné se materiál propláchl a promyl pod tekoucí vodou. Následně se vařil v 5% roztoku hydroxidu sodného. První várka i druhá várka s 30minutovou dobou varu v hydroxidu sodném byla nedostatečná. Další várka s 2hodinovým varem v kyselině dusičné a následným 2hodinovým varem v hydroxidu sodném vedla k uspokojivým výsledkům. Nej kvalitnější vzorek byl však získán po 45minutové várce v 6% kyselině dusičné a 8hodinové extrakci v 5% hydroxidu sodném.

Po varu v hydroxidu sodném se odebral vzorek, který byl procezen, propláchnut vodou a následně zchlazen. Poté se vzorek vyždímal, aby se odstranil přebytečný louh. Rozvláknění probíhalo v mixéru po dobu 3 minut s 1 litrem vody pro dokonalé rozvláknění delignifikovaného dřeva. Délka varu a použité chemikálie měly významný vliv na kvalitu rozvlákněného materiálu. Delignifikace bukového masivního dřeva proběhla s úspěchem.



Obrázek 7 Vzorky podrobené různým časům várek (delignifikace)



Obrázek 8 Vzorky podrobené různým časům várek (delignifikace)

4.3 Výroba průhledného dřeva

Po první fázi přípravy materiálu pro výrobu průhledného dřeva (delignifikaci materiálu) jsme získali potřebné množství rozvlákněného dřeva (buničiny). Tento materiál byl pak následně řádně smíchán s epoxidovou pryskyřicí.

Nejprve byly smíchány obě složky epoxydové pryskyřice v hmotnostním poměru 100:66 (A:B) (pryskyřice: tvrdidlo). Jako nádoba pro smíchání epoxidu s tvrdidlem a s buničinou byla použita čistá a suchá skleněná nádoba. Do této nádoby bylo navážené požadované množství složky A, a následně i tvrdidla B v uvedeném mísicím poměru.

Pryskyřice s tvrdidlem a buničinou byly společně míchány po dobu 15 minut (3000 otáček za minutu) ve směru hodinových ručiček pomocí hřídelové míchačky značky WITEG (Obrázek 11).

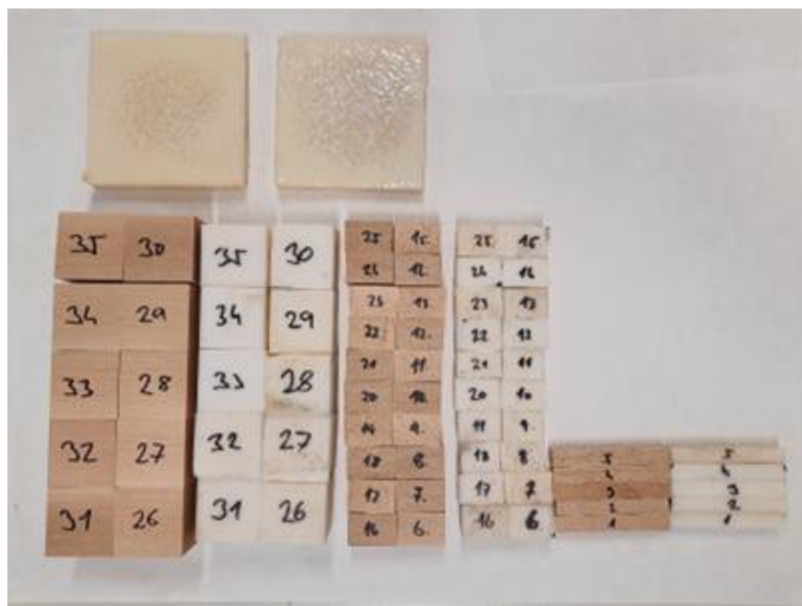


Obrázek 9 Hřídelová míchačka značky WITEG

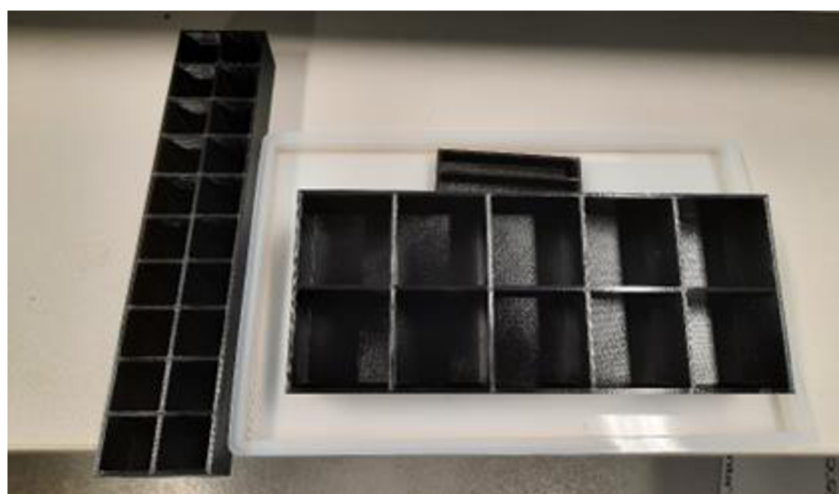
Po akurátním smíchání buničiny s epoxidovou pryskyřicí a tvrdidlem bylo nutné získat požadovaný tvar pro další zkoumání tohoto materiálu. Bylo tedy nutné na 3D tiskárně vytisknout formičky požadovaných rozměrů (Obrázek 13). Tím byly rozměry 10×10×74 (mm) na zkoušku kyslíkového čísla, 30×20×20 (mm) na zkoušku pevnosti v tlaku, 40×40×40 (mm) na stanovení tvrdosti podle Brinella, 100×100×10 (mm) na zkoušku požární odolnosti a 195×290×15 (mm) na měření optických vlastností.

Při odlévání do forem byly použity i silikonové formy, které jsou vhodnější volbou při manipulaci s epoxidovou pryskyřicí. Vzhledem k omezeným možnostem dostupnosti požadovaných rozměrů a tvarů těchto forem nebylo možné silikonové formy využít pro každý pokus měření.

Pro optimální konzistenci a kvalitní výsledek byla veškerá manipulace se smíchanou pryskyřicí s buničinou při teplotě prostředí i hmoty cca 20 °C. Nízké teploty totiž mohou negativně ovlivnit konečný výsledek. Pro rychlejší vytvrzení a zabránění usazování vláken na dně formy byla použita trouba o teplotě 50 °C.



Obrázek 10 Hotové vzorky pro testování průhledného dřeva



Obrázek 11 Formičky z 3D tiskárny pro získání požadovaných rozměrů průhledného dřeva

4.4 Testování průhledného dřeva

Testování průhledného dřeva je komplexní proces, který zahrnuje zkoumání jeho mechanických, optických a protipožárních vlastností. Získané výsledky slouží k charakterizaci materiálu a k posouzení jeho vhodnosti pro různé aplikace. Důležité je zdůraznit, že vlastnosti průhledného dřeva se mohou lišit v závislosti na použité technologii výroby a typu použitého dřeva. V následujících kapitolách se tedy budeme věnovat testování mechanických vlastností, konkrétně tedy pevnosti v tlaku, kde bude materiál podroben „stlačení“. Dále bude průhledné dřevo testováno na optické vlastnosti, a to na charakterizaci bělosti, fluorescence, opacity a barevnosti. Vzhledem k široké škále využití tohoto materiálu je pro tuto diplomovou práci také nutné zjistit protipožární odolnost průhledného dřeva za testování pomocí kónického kalorimetru a následné zjištění kyslíkového čísla.

4.4.1 Pevnost v tlaku

Zkušební vzorky s rozměry přibližně 30×20×20 mm, použité v experimentu, prošly před samotným testováním procesem aklimatizace v laboratorních podmínkách. Tato aklimatizace trvala dostatečně dlouhou dobu na to, aby se vlhkost všech vzorků sjednotila. Pro měření mechanických vlastností v laboratorních podmínkách byl použit zkušební stroj TIRA test 2850 (Obrázek 14), určený pro zkoušky pevnosti materiálů. Stroj byl před zkouškou nastaven pro testování tlakové pevnosti materiálu dle normy ČSN 49 0112 (ČSN, 1979). Před zahájením testování proběhlo přesné měření rozměrů všech vzorků.



Obrázek 12 TIRA test 2850

Po změření rozměrů všech vzorků probíhalo testování v tlaku na zkušebním stroji. Vzorky byly jednotlivě vkládány do stroje a postupně zatěžovány konstantní rychlostí posuvu čelistí 10 mm/min. Během zkoušky měřicí zařízení s výpočetní stanicí kontinuálně zaznamenávalo posun čelistí a odpovídající sílu. U testovaných vzorků bukového dřeva probíhalo měření až do dosažení meze pevnosti, tzn. do okamžiku porušení vzorku. U testovaných vzorků průhledného dřeva bylo testování omezeno časem, jelikož nebylo dosaženo mezní pevnosti.

4.4.2 Tvrdost podle Brinella

Metodika zkoušky tvrdosti dle Brinella, definována normou ČSN EN ISO 6506-1(ČSN, 2006), kvantifikuje tvrdost materiálu na základě středního průměru vtisku (d) vytvořeného sférickým indentorem z tvrdokovu. Normalizované průměry indentoru (D) 10, 5, 2,5 a 1 mm

se volí s ohledem na rozměry zkušebního tělesa. Standardní doba zatížení povrchu zkušebního tělesa indentorem trvá 10-15 sekund.

Při měření tvrdosti průhledného dřeva se vzorek upevnil, a na ovládacím panelu se nastavila hodnota síly razníku 500N (tato hodnota je uváděna v literatuře pro měření Brinellovy tvrdosti středně tvrdých dřevin) a průměr indentoru (D) byl zvolen 2,5 mm, vzhledem k tloušťce zkoušeného materiálu (10 mm).

V momentě, kdy se razník dostal do kontaktu s materiálem, zkouška byla přerušena s doprovodem chybové hlášky, signalizující špatné umístění, či nevložení materiálu pro testování. Při opakovaných pokusech a změnách pozice materiálu v přístroji následovala změna působící síly razníku na 250N. I po tomto zákroku však nebylo možné zkoušku tvrdosti podle Brinella provést.

4.4.3 Optické vlastnosti

Optické vlastnosti všech připravených vzorků průhledného dřeva byly objektivně vyhodnoceny pomocí spektrofotometru FRANK PTI CM-3830. Pro každý vzorek byly souřadnice stanoveny opakovaně na různých místech vzorku. Pro popis optických vlastností byl použit prostor CIE $L^*a^*b^*$ při denním osvětlení D65 a úhlem pozorovatele 10° . Z těchto vzorků byla dopočtena barvová odchylka Δ^*E podle ISO 11664-6 (ISO, 2013):

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}, \quad (1)$$

kde:

ΔE^*	barvová odchylka
ΔL^*	světlost
Δa^*	barvové souřadnice (červená–zelená)
Δb^*	barvové souřadnice (žlutá–modrá) (ISO, 2013).

Obdobně byla dopočtena o chroma C , která představuje sytost barvy

$$C = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}, \quad (2)$$

kde:

C	
Δa^*	barvové souřadnice (červená–zelená)
Δb^*	barvové souřadnice (žlutá–modrá).

Odstín barvy h lze vyjádřit jako úhel odstínu h ve stupních definovaný jako

$$h = \arctg \left(\frac{b^*}{a^*} \right), \quad (3)$$

kde:

h	
Δa^*	barvové souřadnice (červená–zelená)
Δb^*	barvové souřadnice (žlutá–modrá).

Úhel odstínu začíná na ose $+a^*$ a je tedy roven 0° , 90° , 180° a 270° pro červenou, žlutou, zelenou a modrou barvu (Völz, 2002).

Kromě barvové prostoru $L^*a^*b^*$ byla ještě pomocí přístroje měřena bělost jako Whiteness CIE a Whiteness CIE-UV a fluorescence CIE. Podle ISO byl stanoven jas jako ISO

Brightness a ISO Brightness -UV a fluorescence ISO Brightness. Poslední hodnotou měřenou pomocí spektrofotometru byla opacita.

4.4.4 Protipožární vlastnosti

Měření probíhala v laboratořích High-tecu, v technologicko-výukovém pavilonu FLD v Praze na kónickém kalorimetru, Obrázek 15.

Kónický kalorimetr umožňuje měřit rychlost uvolňovaného tepla ze zkoušeného vzorku materiálu v souladu s normou ISO 5660-1 (ISO, 2015). Měření probíhá za definovaných podmínek tepelného radiačního zatížení, které lze dle potřeby upravovat. Během zkoušky je kontinuálně monitorována hmotnost vzorku a zároveň je analyzován úbytek kyslíku ve zplodinách hoření.



Obrázek 13 Kónický kalorimetr

Před zahájením zkoušky byly provedeny nezbytné úkony pro zajištění správné funkce kalorimetrického systému:

- Analyzátor kyslíku byl zapnut a kalibrován na koncentraci 20,76 %.
- Váha byla zapnuta a kalibrována na nulovou hodnotu.
- Byla spuštěna jednotka sběru dat.
- Vzorek pro zkoušku byl připraven – neexponované povrchy byly obaleny hliníkovou fólií a vzorek byl vložen do rámečku.

Účinnost retardačního systému byla hodnocena na základě analýzy klíčových parametrů, jako je maximální průměrná rychlost uvolněného tepla (MARHE), která udává nejvyšší průměrnou rychlost uvolňování tepla během zkoušky, dále maximální hodnota uvolňovaného

tepla během hoření materiálu (vrchol – PHRR), celková spotřeba kyslíku, která koreluje s celkovým uvolněným teplem a energetickou bilancí hoření, a konečné množství vzniklého kouře, jež představuje riziko zhoršení viditelnosti a toxicity.

Pro zajištění přesného měření je nutné, aby horní povrch zkušební vzorku lícovale s horní hranou držáku. Vzhledem k různým tloušťkám všech testovaných vzorků tak byla pod testovaný materiál vždy přidána hliníková vrstva, aby se dosáhlo stejných úrovní u všech vzorků. Testování všech vzorků proběhlo za standardní teploty zářiče a to 850 °C a tepelného toku 50 kW/m².



Obrázek 15 Vzorky před testováním na kónickém kalorimetru

Nejprve se testovaly vzorky bukového dřeva, následně vzorky průhledného dřeva.

Tabulka 4 Rozměry testovaných vzorků bukového dřeva na protipožární odolnost

Buk				
č. vzorku	a (mm)	b (mm)	c (mm)	hmotnost (g)
1	99,38	100,53	20,77	142,6
2	99,54	100,42	20,25	140,7
3	99,80	99,82	20,22	140,74

Tabulka 5 Rozměry testovaných vzorků průhledného dřeva na protipožární odolnost

Průhledné dřevo				
č. vzorku	a (mm)	b (mm)	c (mm)	hmotnost (g)
1	96,00	97,58	7,00	66,69
2	99,39	98,97	6,50	67,00

4.4.5 Kyslíkové číslo

U zjišťování kyslíkového čísla průhledného dřeva (Oxygen Index), dále jen *OI*, se testování zaměřuje na minimální koncentraci kyslíku v atmosféře, která je nutná k udržení hoření materiálu. Čím vyšší je *OI* hodnota, tím hůře materiál hoří a tím je odolnější proti vznícení. Tento druh testování materiálu představuje pravděpodobně nejehospodárnější a nejpreciznější metodu pro kontrolu kvality hořlavých materiálů. Zjišťování *OI* funguje na principu monitorování reakce vzorku na otevřený oheň po dobu kontaktu 15 vteřin po 5 opakováních s 15vteřinovou prodlevou mezi jednotlivými kontakty (15 vteřin kontakt, 15 vteřin nulový kontakt, 15 vteřin kontakt atd., dokud vzorek neprojeví reakci).

Pro tento test bylo použito 5 vzorků bukového dřeva a 5 vzorků průhledného dřeva požadovaných rozměrů, viz příloha č. 1.

Průběh testování byl pod dohledem odborné a kompetentní osoby za dodržování stanovených norem BS 2782, část 141 (BS, 2011) a ISO 4589 (ISO, 2017).

Kondicionované (testovací) vzorky byly před samotným testováním skladovány přes 88 hodin při teplotě 23 °C při relativní vlhkosti 50 %.

Před zahájením testování bylo nutné zkontrolovat veškeré pomůcky, tj. kontrola stavu testovacího komínu, úchytek pro materiál, kahan a těsnění dusíku a kyslíku, který proudí testovacím komínem. Po kontrole stavu zařízení se přístroj uvedl do provozu a otevřel se ventil pro plynné látky. Před nastavením hodnot proudění kyslíku s dusíkem je třeba vědět, jakou počáteční hodnotou se bude začínat testováním materiálu. To lze několika způsoby. Pokud se jedná o známý materiál, v našem případě bukové dřevo, lze počáteční hodnotu zvolit na základě dostupných informací:

Typické *OI* hodnoty pro různé materiály:

Dřevo: 20–25 %

Plastové fólie: 18–22 %

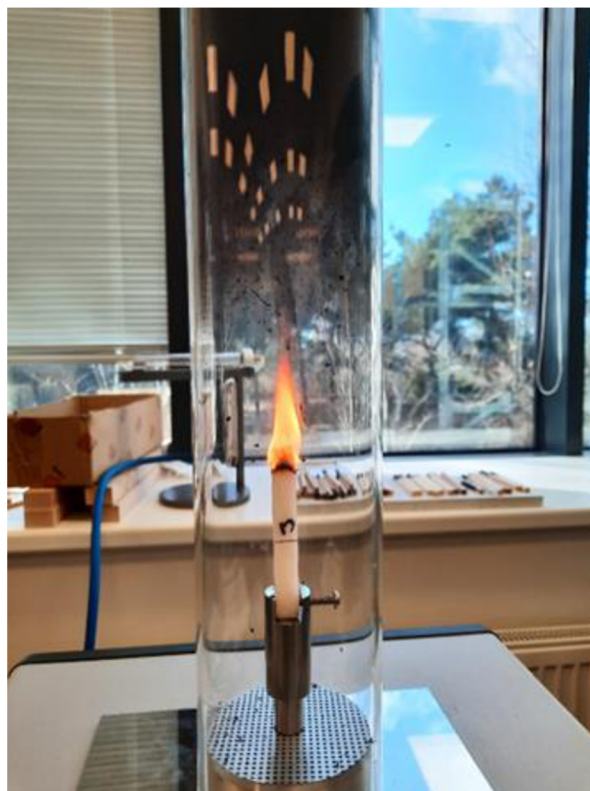
Textilní materiály: 25–30 %

Kovy: Nehořlavé (*OI* > 100 %) (fire-testing.com)

Pokud se však jedná o testování průhledného dřeva s neznámými hodnotami *OI*, je však potřeba zvolit metoda zkoušky zapálení vzorku na vzduchu, mimo testovací komín a pozorovat chování hoření. Vzorek průhledného dřeva vykazoval rychlejší reakci na otevřený plamen, jak bukové dřevo, z čehož lze usoudit, že *OI* bude patřičně menší.



Obrázek 14 Kyslíkové číslo (bukové dřevo)



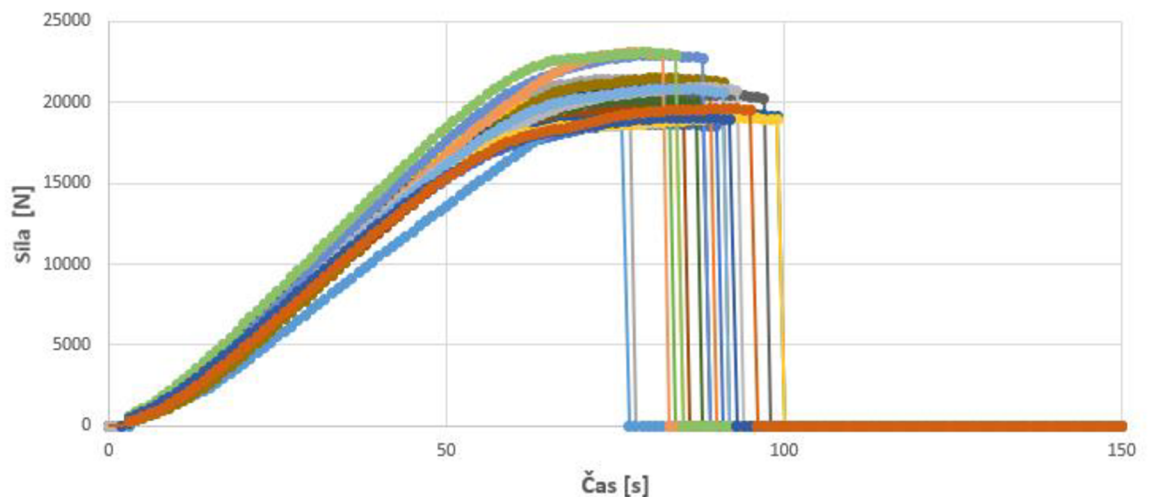
Obrázek 15 Kyslíkové číslo (průhledné dřevo)

5. Výsledky

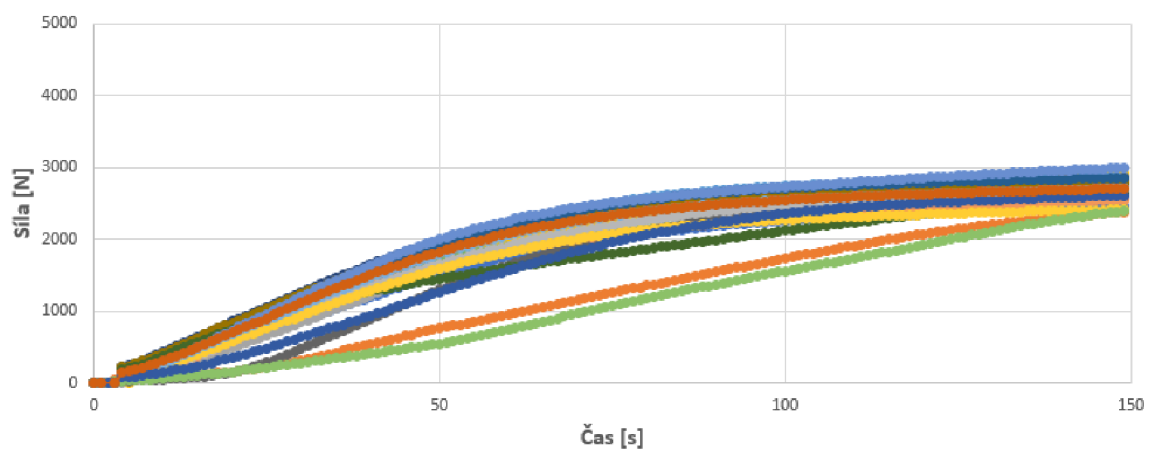
Tato kapitola shrnuje výsledky a data experimentální části, která se zabývala zkoumáním vlastností průhledného dřeva. Jsou zde popsány výsledky mechanických, optických a protipožárních vlastností. Cílem této kapitoly je poskytnout komplexní přehled vlastností průhledného dřeva a usnadnit tak jeho srovnání s běžným dřevem a s alternativními materiály. Získané výsledky experimentální části slouží jako základ pro diskuzi o potenciálním využití průhledného dřeva v praxi a pro navržení směřování dalšího výzkumu v této oblasti.

5.1 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku a její hodnoty jsou zobrazeny na Obrázku 18 pro samotné bukové dřevo a na Obrázku 19 pro průhledné dřevo vyrobené z dusičnано-alkalické bukové buničiny.

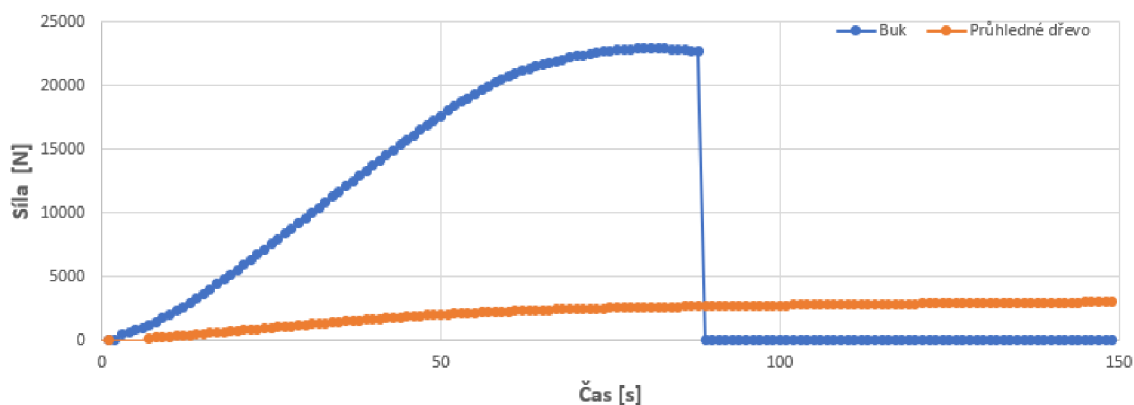


Obrázek 16 Závislost síly na čase při zkoušce pevnosti v tlaku – bukové dřevo



Obrázek 17 Závislost síly na čase při zkoušce pevnosti v tlaku – průhledné dřevo

Jelikož graf na Obrázcích 18 a 19 vytvořených ze všech proběhlých měření je nečitelný, byl vytvořen jeden hromadný pro vybraný vzorek bukového dřeva a průhledného dřeva z něj vyrobeného, Obrázek 20.



Obrázek 18 Závislost síly na čase při stanovení pevnosti v tlaku – porovnání

Z uvedeného Obrázku 20 je zřejmé, že každý materiál vykazuje úplně jiný trend při měření. U dřeva dochází při působení tlaku ve směru vláken k deformaci, která se projeví zkrácením délky tělesa. Avšak u průhledného dřeva nedocházelo k deformaci jako takové, ale pouze ke stlačování elastomeru. Výsledky tlakových zkoušek jsou uvedeny v Tabulce 6.

Tabulka 6 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku	Bukové dřevo	Průhledné dřevo
Průměr	51,82 MPa	7,29 MPa
Směrodatná odchylka	3,41 MPa	0,47 MPa

5.2 Optické vlastnosti

V následujících Tabulkách 7 až 12 jsou uvedené barvové a další optické vlastnosti včetně směrodatné odchylky v závorce.

Tabulka 7 Barvové vlastnosti průhledného dřeva z dusičnано-alkalické bukové buničiny

Vzorek	L^*	a^*	b^*	ΔE^*	C	h
10 % suspenze	85,74 (0,00)	-0,38 (0,00)	14,31 (0,00)	–	14,31 (0,01)	1,57 (0,00)
20 % suspenze	85,69 (0,01)	-0,46 (0,01)	15,87 (0,02)	–	15,87 (0,02)	1,57 (0,00)
10 % suspenze 1 % tyrkys	88,29 (0,01)	-2,60 (0,01)	14,60 (0,01)	3,39 (0,02)	14,83 (0,02)	1,54 (0,00)
10 % suspenze 2 % tyrkys	86,99 (0,01)	-3,65 (0,03)	14,49 (0,02)	3,50 (0,03)	14,94 (0,02)	1,51 (0,00)
10 % suspenze 1 % zeleň	87,05 (0,01)	-1,39 (0,01)	10,39 (0,01)	4,25 (0,01)	10,48 (0,01)	1,55 (0,00)
20 % suspenze 1 % tyrkys	82,02 (0,00)	-1,06 (0,01)	13,91 (0,02)	4,20 (0,01)	13,95 (0,02)	1,57 (0,00)
20 % suspenze 1 % zeleň	84,56 (0,01)	-1,35 (0,01)	10,43 (0,01)	5,62 (0,02)	10,51 (0,02)	1,55 (0,00)
40 % suspenze	89,16 (0,00)	0,70 (0,00)	14,56 (0,01)	–	14,57 (0,01)	1,57 (0,00)

Tabulka 8 Barvové vlastnosti průhledného dřeva ze sulfátové buničiny

Vzorek	L^*	a^*	b^*	ΔE^*	C	h
10 % suspenze	69,22 (0,01)	-1,21 (0,01)	4,13 (0,01)	–	4,31 (0,01)	1,49 (0,00)
10 % suspenze 1 % tyrkys	32,79 (0,01)	-1,44 (0,01)	1,23 (0,04)	36,54 (0,02)	1,90 (0,05)	0,63 (0,01)
10 % suspenze 2 % tyrkys	63,56 (0,03)	-2,14 (0,01)	2,22 (0,02)	6,04 (0,03)	3,09 (0,02)	0,82 (0,00)
10 % suspenze 1 % zeleň	35,93 (0,01)	-1,37 (0,02)	1,33 (0,03)	33,41 (0,01)	1,91 (0,03)	0,76 (0,02)

Tabulka 9 Barvové vlastnosti průhledného dřeva z natronové buničiny

Vzorek	L^*	a^*	b^*	ΔE^*	C	h
10 % suspenze	73,47 (0,01)	-1,03 (0,01)	2,90 (0,01)	–	3,08 (0,02)	1,45 (0,00)
10 % suspenze 1 % tyrkys	65,31 (0,00)	-0,99 (0,02)	3,35 (0,01)	8,18 (0,00)	3,50 (0,01)	1,44 (0,00)
10 % suspenze 1 % zeleň	73,63 (0,01)	-1,49 (0,02)	2,04 (0,02)	0,99 (0,02)	2,53 (0,03)	1,08 (0,01)

Tabulka 10 Optické vlastnosti průhledného dřeva z dusičnано-alkalické bukové buničiny

Vzorek	Whiteness			Brightness			Opacita
	CIE	CIE-UV	F-CIE	ISO	ISO-UV	F-ISO	
10 % suspenze	-3,59 (0,08)	-4,58 (0,46)	0,79 (0,10)	53,61 (0,06)	53,41 (0,03)	0,20 (0,09)	0
20 % suspenze	-16,82 (0,49)	-17,30 (0,21)	0,48 (0,29)	50,64 (0,15)	50,53 (0,11)	0,11 (0,04)	0
10 % suspenze 1 % tyrkys	1,23 (0,27)	-0,20 (0,16)	1,43 (0,14)	58,16 (0,04)	57,65 (0,01)	0,51 (0,03)	0
10 % suspenze 2 % tyrkys	-1,31 (0,18)	-2,81 (0,11)	1,50 (0,08)	56,56 (0,17)	55,97 (0,17)	0,59 (0,02)	0
10 % suspenze 1 % zeleň	19,46 (0,11)	19,16 (0,08)	0,30 (0,08)	60,00 (0,09)	59,92 (0,09)	0,08 (0,01)	0
20 % suspenze 1 % tyrkys	-11,70 (0,14)	-12,96 (0,13)	1,26 (0,11)	47,69 (0,02)	47,57 (0,02)	0,12 (0,02)	0
20 % suspenze 1 % zeleň	12,56 (0,05)	12,09 (0,03)	0,46 (0,06)	55,11 (0,02)	55,20 (0,02)	-0,09 (0,01)	0
40 % suspenze	4,61 (0,17)	3,75 (0,11)	0,86 (0,10)	59,05 (0,03)	58,87 (0,02)	0,18 (0,02)	0

Tabulka 11 Optické vlastnosti průhledného dřeva ze sulfátové buničiny

Vzorek	Whiteness			Brightness			Opacita
	CIE	CIE-UV	F-CIE	ISO	ISO-UV	F-ISO	
10 % suspenze	15,77 (0,41)	13,79 (0,16)	1,98 (0,29)	37,74 (0,07)	37,67 (0,04)	0,07 (0,10)	0
10 % suspenze 1 % tyrkys	-5,68 (0,59)	-8,20 (0,40)	2,53 (0,60)	7,15 (0,03)	7,14 (0,02)	0 (0,01)	0
10 % suspenze 2 % tyrkys	18,11 (0,14)	16,50 (0,15)	1,61 (0,09)	31,14 (0,04)	30,98 (0,04)	0,16 (0,01)	0
10 % suspenze 1 % zeleň	-4,32 (0,57)	-5,19 (0,60)	1,32 (0,25)	8,71 (0,02)	8,71 (0,02)	0 (0,02)	0

Tabulka 12 Optické vlastnosti průhledného dřeva z natronové buničiny

Vzorek	Whiteness			Brightness			Opacita
	CIE	CIE-UV	F-CIE	ISO	ISO-UV	F-ISO	
10 % suspenze	29,60 (0,16)	27,87 (0,12)	1,77 (0,08)	43,67 (0,04)	43,52 (0,03)	0,15 (0,01)	0
10 % suspenze 1 % tyrkys	13,33 (0,15)	12,03 (0,09)	1,32 (0,09)	32,55 (0,11)	32,38 (0,07)	0,19 (0,01)	0
10 % suspenze 1 % zeleň	34,42 (0,19)	35,33 (0,03)	-0,50 (0,08)	44,80 (0,01)	44,87 (0,00)	-0,08 (0,00)	0

5.3 Protipožární vlastnosti

V následujících Tabulkách 13 a 14 jsou uvedené naměřené hodnoty pro bukové dřevo a pro průhledné dřevo vyrobené z dusičnано-alkalické bukové buničiny.

Tabulka 13 Výsledky měření testovaných vzorků bukového dřeva na protipožární odolnost

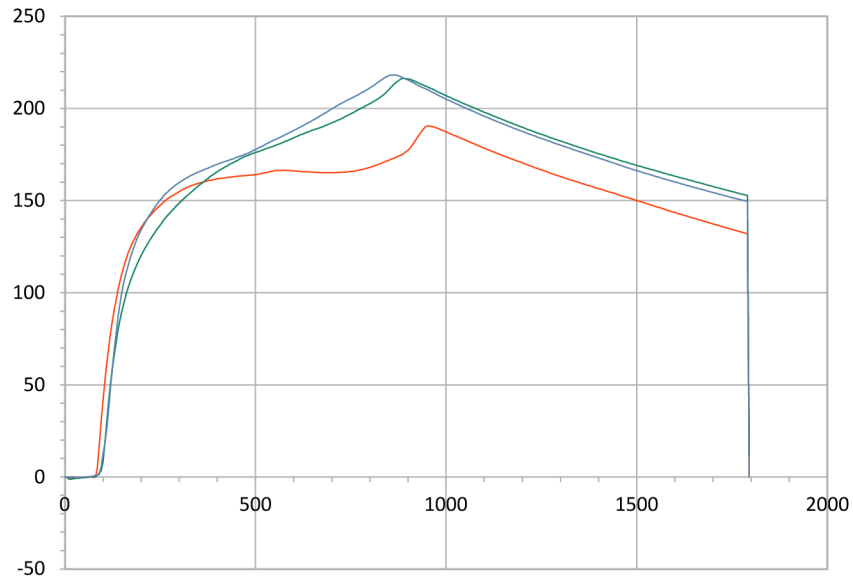
Bukové dřevo	Jednotky	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr:
Tloušťka vzorku v mm:	mm	20,77	20,25	20,22	6,7
Hmotnost vzorku v g:	g	142,61	140,73	140,74	141,34
Plocha vzorku v cm ² :	cm ²	88,41	88,44	88,44	88,43
Ozáření vzorku v kW/m ² :	kW/m ²	25,01	25,03	25,01	25,02
Začátek trvalého plamene	s	82,09	87,01	94	87,71
Hmotnost při vznícení v g:	g	142,06	140,26	139,80	140,71
Doba testu	s	1801	1801	1801	1801
q(A,60)	kW/m ²	229,61	198,32	241,31	223,10
q(A,180)	kW/m ²	211,70	203,01	227,32	214,03
q(A,300)	kW/m ²	201,34	206,91	216,42	208,21
q(A,max)	kW/m ²	472,71	393,21	344,03	403,33
Čas při q(A,max)	s	925	860	815	866,7
Celkové teplo	MJ/m ²	235,01	272,04	266,34	257,83
Hmotnost trvalý plamen	g	142,06	140,26	140,01	140,77
Hmotnost ukončený test	g	13,29	13,82	24,95	17,35
Úbytek hmotnosti	g/m ²	14567	14303	13015	13962
Rychlost úbytku hmotnosti	g/m ² s	8,51	8,31	7,62	8,11
Rychlost úbytku hm.10–90 %	g/m ² s	13,11	14,13	15,61	14,31
THR(0-300)	MJ/m ²	60,41	62,17	64,94	62,55
THR(0-600)	MJ/m ²	111,5	129,7	135,9	125,7
THR(0-1200)	MJ/m ²	209,88	234,74	232,21	225,61
EHC (průměr)	MJ/kg	21,24	30,95	14,51	22,21
MARHE	kW/m ²	190,51	216,42	218,21	208,43
Spalné teplo	MJ/kg	16,14	19,04	20,52	18,53

Tabulka 14 Výsledky měření testovaných vzorků průhledného dřeva na protipožární odolnost

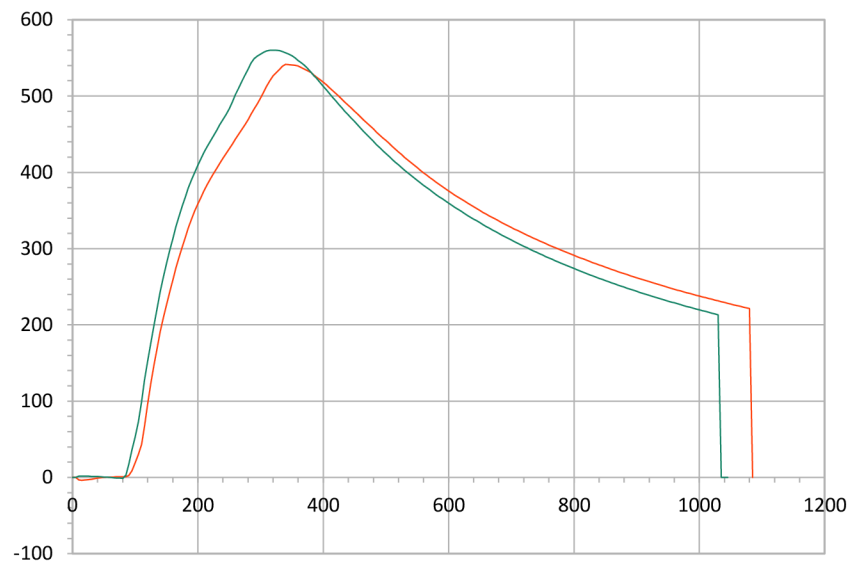
Průhledné dřevo		Měření 1	Měření 2	Měření 3	Průměr:
Tloušťka vzorku v mm:	mm	7	0	0	3,51
Hmotnost vzorku v g:	g	66,69	67	0	66,73
Plocha vzorku v cm ² :	cm ²	88,44	88,44	0	88,44
Ozáření vzorku v kW/m ² :	kW/m ²	25	25	0	25,01
Začátek trvalého plamene	s	91	82	0	86,52
Hmotnost při vznícení v g:	g	67,22	65,91	0	66,57
Doba testu	s	1093	1052	0	1073
q(A,60)	kW/m ²	544,53	549,14	0,0	546,82
q(A,180)	kW/m ²	670,23	711,34	0,0	690,84
q(A,300)	kW/m ²	672,63	664,64	0,0	668,61
q(A,max)	kW/m ²	970,37	993,25	0,0	981,84
Čas při q(A,max)	s	300	285	0	292,54
Celkové teplo	MJ/m ²	236,91	217,52	0,0	227,23
Hmotnost trvalý plamen	g	67,22	65,91	0,0	66,57
Hmotnost ukončený test	g	0,58	2,48	0,0	1,53
Úbytek hmotnosti	g/m ²	7538	7175	0	7357
Rychlost úbytku hmotnosti	g/m ² s	7,54	7,45	0,0	7,51
Rychlost úbytku hm.10–90 %	g/m ² s	23,64	25,52	0,0	24,63
THR(0-300)	MJ/m ²	201,81	199,42	0,0	200,62
THR(0-600)	MJ/m ²	227,23	216,17	0,0	221,74
THR(0-1200)	MJ/m ²	236,91	217,56	0,0	227,24
EHC (průměr)	MJ/kg	58,35	19,51	0,0	38,96
MARHE	kW/m ²	541,44	560,05	0,0	550,79
Spalné teplo	MJ/kg	31,43	30,32	0,0	30,91

5.3.1 MARHE

Na následujících obrázcích je zobrazena maximální průměrná rychlost uvolněného tepla, tzv. MARHE. Obrázek 21 pro bukové dřevo a Obrázek 22 ukazuje maximální průměrnou rychlost uvolněného tepla pro průhledné dřevo z dusičnано-alkalické buničiny.



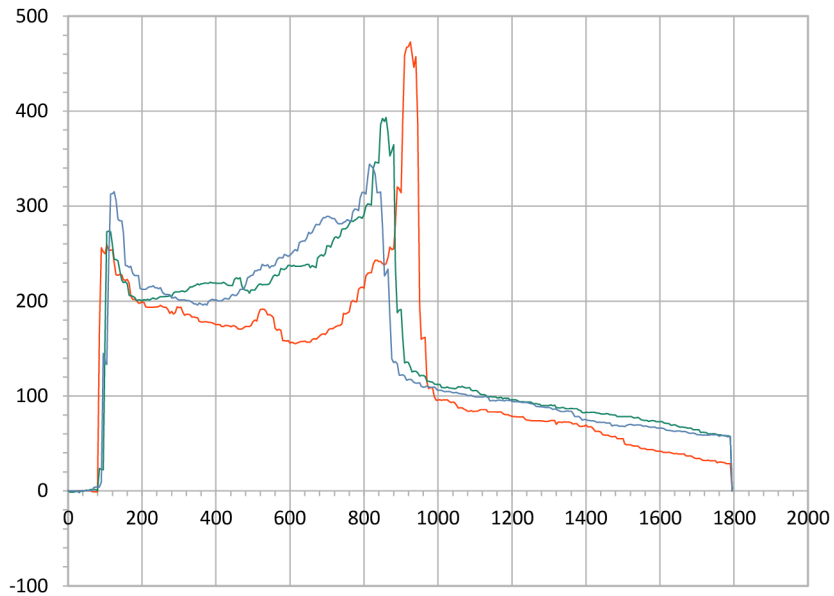
Obrázek 19 MARHE bukové dřevo (osa x = čas, osa y = kW/m²)



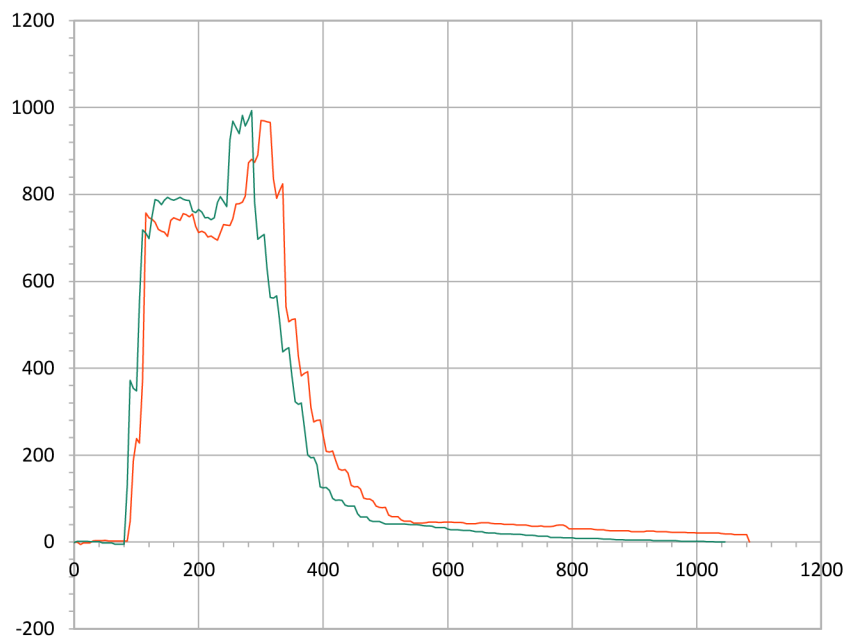
Obrázek 20 MARHE průhledné dřevo (osa x = čas, osa y = kW/m²)

5.3.2 PHRR

Další hodnotou je PHRR (vrchol) uvádí maximální hodnotu uvolňovaného tepla během hoření materiálu. V následujících Obrázcích 23 a 24 jsou opět uvedené příklady pro bukové a průhledné dřevo.



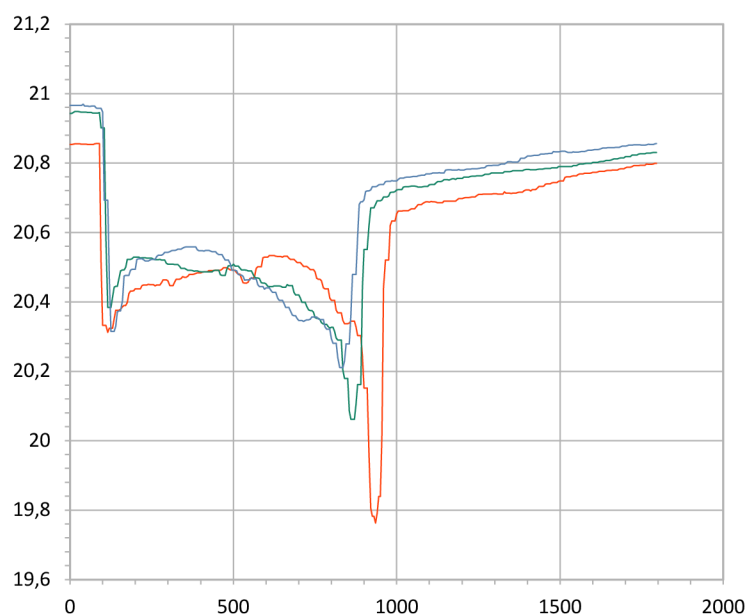
Obrázek 21 PHRR bukové dřevo (osa x = čas, osa y = kW/m²)



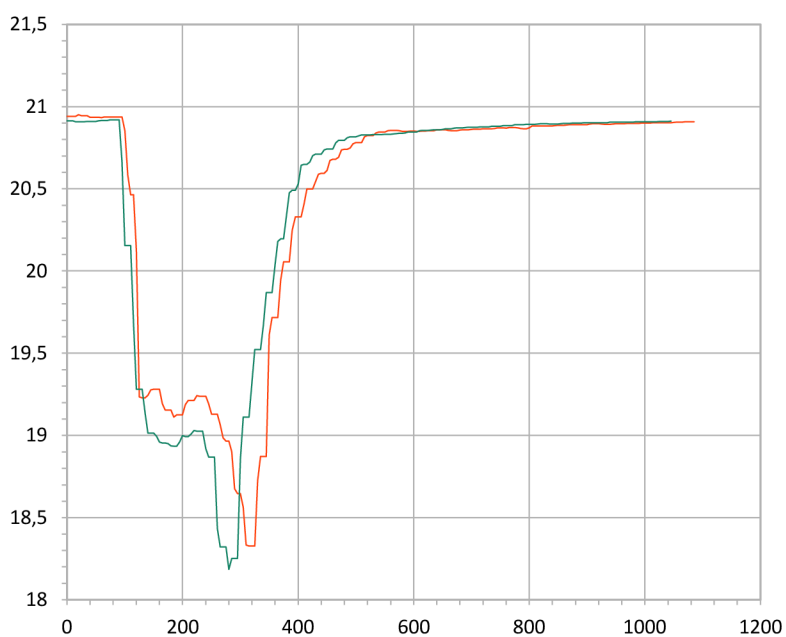
Obrázek 22 PHRR průhledné dřevo (osa x = čas, osa y = kW/m²)

5.3.3 Koncentrace O₂

Celková spotřeba kyslíku koreluje s celkovým uvolněným teplem a energetickou bilancí hoření a je zobrazena pro bukové dřevo, Obrázek 25, a pro průhledné dřevo z buku vyrobené, Obrázek 26.



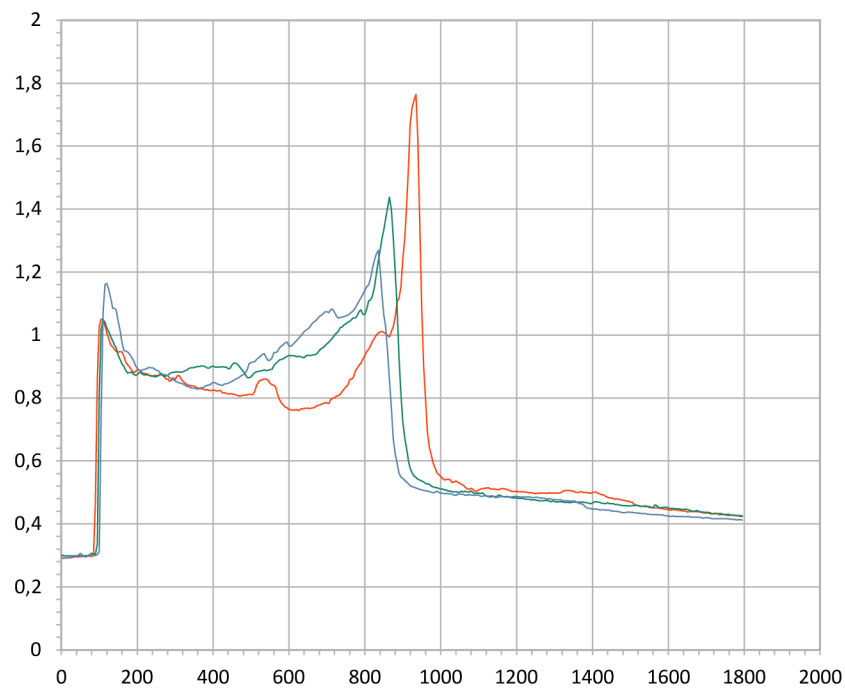
Obrázek 23 Koncentrace O_2 u vzorků bukového dřeva v průběhu testování (osa x = čas, osa y = %)



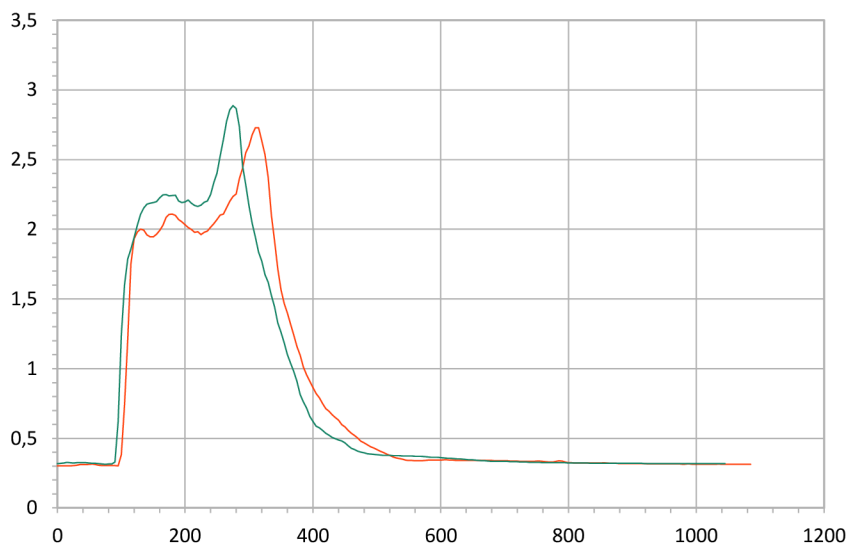
Obrázek 24 Koncentrace O_2 u vzorků průhledného dřeva v průběhu testování (osa x = čas, osa y = %)

5.3.4 Koncentrace CO_2

Dalším základním parametrem protipožárních vlastností je množství vzniklého kouře, které představuje riziko zhoršení viditelnosti a toxicity, a je vyjádřené jako koncentrace oxidu uhličitého. Obdobně jako u předchozích protipožárních parametrů jsou uvedeny Obrázky 27 a 28 pro bukové a průhledné dřevo.



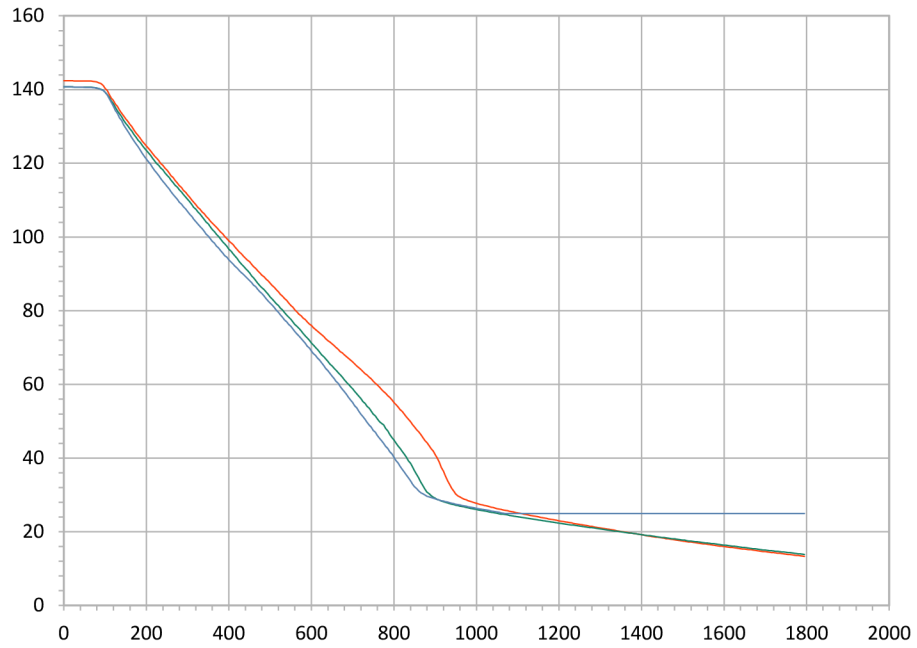
Obrázek 25 Koncentrace CO₂ u vzorků bukového dřeva v průběhu testování (osa x = čas, osa y = %)



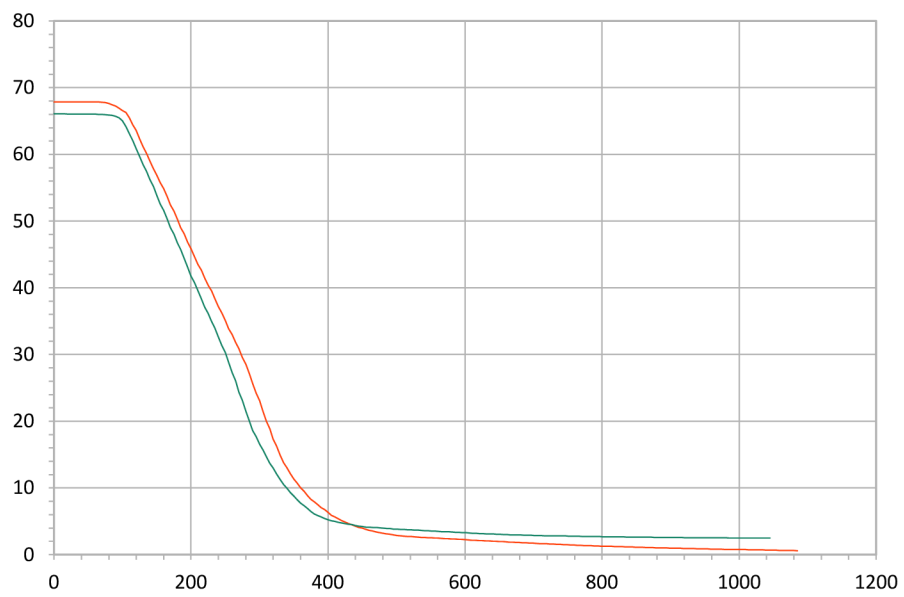
Obrázek 26 Koncentrace CO₂ u vzorků průhledného dřeva v průběhu testování (osa x = čas, osa y = %)

5.3.5 Úbytek materiálu

Posledním hlavním parametrem je úbytek hmotnosti při protipožární zkoušce, toto stanovení je zobrazeno na Obrázku 29 a 30, obdobně jako u předešlých pro bukové a průhledné dřevo.

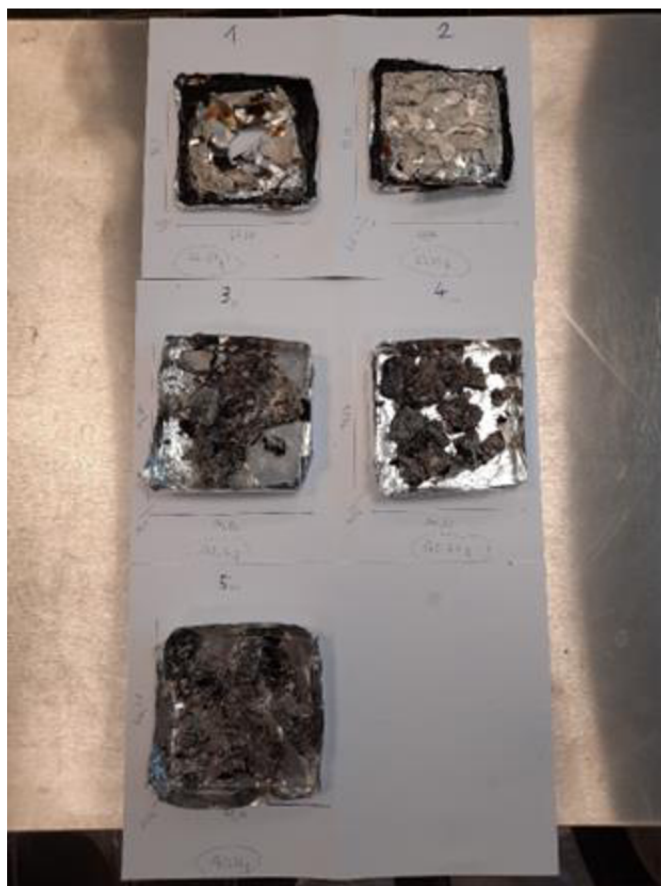


Obrázek 27 Úbytek materiálu při testování u bukového dřeva (osa x = čas (s), osa y = hmotnost (g))



Obrázek 28 Úbytek materiálu při testování u průhledného dřeva (osa x = čas (s), osa y = hmotnost (g))

Obrázek 31 ukazuje všechny vzorky po analýze protipožárních vlastností na kónickém kalorimetru.



Obrázek 29 Vzorčky po testování na kónickém kalorimetru

5.4 Kyslíkové číslo

Kyslíkové číslo bylo stanoveno podle ISO 4589 (ISO, 2017), výsledky jsou uvedeny v Tabulkách 15 až 17.

Tabulka 15 Výsledky zkoušky kyslíkového čísla (bukové dřevo) podle normy ISO 4589

Určení předběžné koncentrace kyslíku u jednoho páru odezev "X", "O" při intervalu koncentrace O₂ ≥ 1%

Koncentrace kyslíku (%)	22	23,6	24	25		
Doba hoření (s)				180		
Spálená délka (mm)				73,25		
Odezva (X nebo O)	0	0	0	X		

Předběžná koncentrace kyslíku (%)	25
-----------------------------------	----

Určení hodnoty kyslíkového čísla

Koncentrace kyslíku (%)	24,1	24,2	24,3	24,4	24,5	24,6
Doba hoření (s)					75,7	180
Spálená délka (mm)					18,75	63,7
Odezva (X nebo O)	0	0	0	0	0	X

Pro výpočet *OI* je potřeba zvážit hodnota a znaménko koeficientu *k*, které lze odvodit z následující Tabulky 16:

Tabulka 16 Hodnoty koeficientu *k* pro výpočet kyslíkového čísla

Odezvy posledních pěti měření	Hodnoty <i>k</i> , pro něž jsou určující tyto první odezvy	
X0000	-0,55	0XXXX
X000X	-1,25	0XXX0
X00X0	0,37	0XX0X
X00XX	-0,17	0XX00
X0X00	0,02	0X0XX
X0X0X	-0,5	0X0X0
X0XX0	1,17	0X00X
X0XXX	0,61	0X000
XX000	-0,30	00XXX
XX00X	-0,83	00XX0
XX0X0	0,83	00X0X
XX0XX	0,30	00X00
XXX00	0,50	000XX
XXX0X	-0,04	000X0
XXXX0	1,60	0000X
XXXXX	0,89	00000

Hodnota *OI* byla vypočtena podle následujícího vztahu:

$$OI = c_F + k \cdot d, \quad (1)$$

kde:

- c_F koncentrace kyslíku v poslední zkoušce
- k přírůstek koncentrace kyslíku
- d koeficient (*OI*).

Pro testovaný vzorek neošetřeného bukového dřeva činila tato hodnota 24,55 %. „Výsledek zkoušky se týká jen chování zkušebních vzorků za podmínek této zkoušky a z těchto výsledků se nesmí odvozovat závěry o požárních rizicích materiálu v jiných formách nebo za jiných požárních podmínek.“ (Návod k přístroji na zjišťování kyslíkového čísla Oxygen Index, 2024).

Stejný způsobem byl analyzován i vzorek průhledného dřeva, viz Tabulka 17.

Tabulka 17 Výsledky zkoušky kyslíkového čísla (průhledné dřevo) podle normy ISO 4589

Určení předběžné koncentrace kyslíku u jednoho páru odezev "X", "O" při intervalu koncentrace O₂ ≥ 1%

Koncentrace kyslíku (%)	18	19				
Doba hoření (s)		180				
Spálená délka (mm)		21,22				
Odezva (X nebo O)	0	X				

Předběžná koncentrace kyslíku (%)	19
-----------------------------------	----

Určení hodnoty kyslíkového čísla

Koncentrace kyslíku (%)	18,3	18,4	18,5	18,6	18,7	18,8
Doba hoření (s)				64,39	76,07	180
Spálená délka (mm)				2,51	2,63	11,43
Odezva (X nebo O)	0	0	0	0	0	X

Pro průhledné dřevo z dusičnано-alkalické bukové buničiny o koncentraci 20 % suspenze činila hodnota OI 18,745 %.

6. Diskuze

6.1 Pevnost v tlaku

Z výsledků naměřených pomocí zkušebního stroje TIRA test 2850 je patrné, že průhledné dřevo má oproti dřevu bukovému markantně nižší pevnost v tlaku. Na rozdíl od bukového dřeva, u kterého bylo ve všech případech měření dosaženo mezního bodu pevnosti, u průhledného dřeva se za stejných podmínek měření tento jev neprojevil. Vzhledem k tomu, že stroj TIRA byl nastaven na konstantní rychlost posuvu čelistí 10 mm/min, síla, která byla potřeba na tento posuv u průhledného dřeva byla skoro až 10× menší. Z výsledků lze říci, že mezní hodnota pevnosti v tlaku bukového dřeva se pohybuje mezi 18–23 kN. Mezní bod u průhledného dřeva však nebyl nalezen ani po 20 minutách konstantně zvyšující se síly, působící na vzorek, vzhledem k vysoké elasticitě. Materiál se však deformoval (stlačil) o cca 66,6 % za působení stejné síly, při které došlo k mezní hodnotě pevnosti u bukového dřeva.

Z tohoto měření tedy nelze jednoznačně určit mezní bod pevnosti v tlaku pro průhledné dřevo, avšak lze říci, že pevnost v tlaku tohoto materiálu je výrazně nižší. Pevnost v tlaku byla stanovena na 51,8 MPa pro bukové dřevo a pro průhledné více jak 7× nižší 7,3 MPa. Přesto se některým autorům podařilo stanovit mez pevnosti v tlaku, avšak při použití pryskyřice obsahující nanočástice, a to 56,1–74,6 MPa pro různě upravené transparentní dřevěné kompozity (Zhang *et al.*, 2020).

6.2 Tvrdost podle Brinella

Jelikož vzorky byly velice elastické, tudíž měkké, nebyly vhodné pro stanovení tvrdosti. Přestože jsme měření testovali, ukázalo se, že vzorek se chová jako „guma“ a kulička přístroje pro měření tvrdosti byla do vzorku vtlačena, ale jelikož je měkký, tak nelze výslednou hodnotu brát jako adekvátní.

Změna tvrdosti vlivem UV záření uvádí Wachter *et al.* (2021), autoři dosáhli hodnot okolo 86, tato hodnota se ani vlivem působení UV záření v průběhu několika dní téměř neměnila, avšak ti jako aditivum použili methyl-methakrylát.

6.3 Optické vlastnosti

Optické vlastnosti jako transparentci či $L^*a^*b^*$ hodnoty uvádí celá řada autorů, avšak s aplikací fotoluminiscenčních pigmentů bohužel žádný nebyl dohledán. Při porovnání různých typů delignifikace pro výrobu průhledného dřeva, tak největší barvové odchylce u 10% suspenze sulfátové buničiny, téměř 7× vyšší než u námi vyrobené buničiny. Hodnoty pro natronovou buničinu byly v případě využití zeleně o něco vyšší než námi vyrobená buničina dusičnано-alkalickým způsobem, avšak v porovnání s využitím tyrkysového pigmentu jsme naopak dosáhli vyšších hodnot u dusičnано-alkalické buničiny.

V případě chroma, tzv. sytosti bylo nejvyšší hodnot dosaženo u 40% suspenze bukové buničiny, což by se dalo i očekávat. V porovnání však se sulfátovou či natronovou delignifikací

bylo dosaženo vyšší hodnoty jak o 10% suspenze, oproti sulfátu $3,3\times$ a oproti natronu dokonce $4,6\times$. Úhel h , který vyjadřuje hodnotu jasu byl stanoven téměř shodně jako u natronové buničiny a u buničiny sulfátové bez přídavku pigmentu.

V porovnání s literaturou, Wachter *et al.* (2021), kteří využívali hydroxyethyl-methakrylát a methyl-methakrylát dosáhli barvové odchylky stejné jako u dusičnано-alkalické buničiny po cca 4 dnech vystavení vzorků UV záření. Avšak hodnot pro sulfátovou buničinu nedosáhli ani po 35 dnech.

Z ostatních optických vlastností lze říct, že bělost CIE byla dosažena nejvyšší pro natronovou delignifikaci, avšak podle ISO Brightness (bělost/jasnost) pro dusičnано-alkalickou delignifikaci. Tyto hodnoty podle CIE byly měřeny i pod vlivem UV či vyjádřeny jako fluorescence, kde naopak nejvyšších hodnot bylo dosaženo u sulfátové delignifikace. Při posuzování podle ISO Brightness při UV světle či fluorescenci bylo dosaženo nejvyšší hodnoty pro průhledné dřevo z dusičnано-alkalické bukové buničiny.

Velice pozitivním zjištěním je hodnota opacita. Opacita je poměr světla dopadajícího ku světlu procházejícímu. Čím nižší hodnota, tím je materiál průhlednější (Souček, 1977). Z tohoto hlediska se v našem případě dle naměřených hodnot jedná o průhledný materiál.

Pro posouzení vlivu fotoluminiscenčního prášku v průhledném dřevu slouží Obrázky 32 až 49, umístěné v příloze, které jsou zobrazeny vždy při standardním osvětlení a následně byly vystaveny po dobu 2 hodin osvětlení v laboratorních podmínkách a zdokumentovány, jak se projevil vliv luminiscence.

6.4 Protipožární vlastnosti

Z porovnání výsledků testovaných vzorků lze říci, že průměrná hodnota MARHE bukových vzorků je $208,4 \text{ kW/m}^2$ a PHRR $403,3 \text{ kW/m}^2$, ale u vzorků průhledného dřeva byly tyto hodnoty $550,7 \text{ kW/m}^2$ pro MARHE a 292 kW/m^2 pro hodnotu PHRR. Z těchto výsledků lze naznačit, že maximální průměrná rychlost uvolněného tepla průhledného dřeva je více než dvakrát tak velká, jak u vzorků dřeva bukového. Dále lze z tohoto testování říci, že rychlost vzplanutí materiálu je velmi podobná u obou vzorků. Zatímco bukové dřevo hořelo trvalým plamenem po (v průměru) 87,7 vteřinách, průhledné dřevo již po 86,5 vteřinách. Z grafů lze také vyčíst, že koncentrace kyslíku u bukového dřeva se v průběhu měření nedostala pod 19,6 %, kdežto u průhledného dřeva byla nejnižší hodnota naměřena mezi 18,5–18,0 %. Maximální hodnota koncentrace oxidu uhličitého byla u bukových vzorků naměřena mezi 1,6–1,8 % a u vzorků průhledného dřeva mezi 2,5–3,0 %. Co se úbytku materiálu týče, bukové dřevo kleslo na hmotnosti o 82,30–89,38 %. Úbytek hmotnosti průhledného dřeva na konci testování bylo o 92,54 % u prvního vzorku a 98,51 % u vzorku druhého.

Z těchto dat lze říci, že protipožární vlastnosti průhledného dřeva je nezbytně nutné dále zkoumat a optimalizovat pro vývoj materiálů splňujících požadavky na požární bezpečnost.

Průhledné dřevo a epoxidová pryskyřice, jako taková, nemají specifickou třídu požární odolnosti EURO, tedy není zařazena do konkrétní požární klasifikace. Nicméně dle klasifikace normy ČSN EN 13501-1 lze z naměřených hodnot zařadit průhledné dřevo mezi skupiny D (snadno hořlavé, dojde k celkovému vzplanutí) a F (extrémně hořlavé, neklasifikované výrobky).

6.5 Kyslíkové číslo

Nejprve byly testovány vzorky bukového dřeva. Z dostupných informací o *OI* dřeva byla počáteční hodnota testování nastavena na 22 % s průtokem kyslíku válcem 10,5 l/min za teploty 27,3 °C. Při těchto hodnotách testovaný vzorek nevykazoval žádnou reakci na otevřený oheň po 5 cyklech kontaktu. Vzorek se tedy odebral z testovacího komína a byl nahrazen novým vzorkem, aby se zajistila správnost a přesnost *OI*. Další vzorek byl upevněn do úchytky a pokračovalo se v měření za hodnot 23 % kyslíku s dusíkem. Ani tento vzorek nevykazoval žádnou reakci po 5 cyklech kontaktu s otevřeným ohněm. Postup výměny vzorků se opakoval až do hodnot 25 %, kde testovaný vzorek projevil první reakci na otevřený oheň. Pro přesnější hodnotu *OI* je potřeba přesnost na minimálně jedno desetinné místo, proto se následně vyměnil testovací vzorek za nový a pokračovalo se v měření s nastavenou hodnotou 24,1 % kyslíku s dusíkem. Tento proces se opět opakoval až do hodnoty 24,5 %, kdy testovací vzorek projevil reakci na otevřený oheň. Doba hoření u tohoto vzorku byla 75,7 vteřin, kdy po tomto čase vzorek dřeva přestal samovolně hořet. Úbytek materiálu byl 18,75 mm ze 70,48mm (Tabulka 18, Samostatné přílohy), což není dostatečné množství, jak časové, tak s ohledem na úbytek materiálu, pro ukončení měření. Následující vzorek byl testován za hodnot 24,6 %, kdy vzorek hořel požadovanou dobu pro řádné měření, tedy 180 vteřin, po kterých se testování ukončilo. Úbytek materiálu testovaného vzorku č. 3 byl 63,7 mm z 73,86mm.

Po nalezení *OI* u bukového dřeva se vzorek vyjmul z testovacího komína a nahradil vzorkem průhledného dřeva. Z „předtestovací“ fáze průhledného dřeva jsme zjistili, že u tohoto materiálu bude kyslíkové číslo patřičně menší, jak u bukového dřeva, proto byla prvotní hodnota kyslíku nastavena na 18 %. Kromě hodnoty kyslíku ve válci proběhlo testování za stejných podmínek (průtok ve válci: 10,5 l/min a teplota ve válci: 27,3 °C). První vzorek po 15vteřinových cyklech neprojevil žádnou reakci. Vyměnil se tedy první vzorek za nový a nastavila se hodnota kyslíku na 19 %. Při těchto procentech průhledné dřevo projevilo reakci na otevřený oheň a test byl ukončen, jako u předchozího (bukového dřeva) vzorku po 180 vteřinách, kdy úbytek materiálu byl 21,22 mm ze 72,74 mm. Následně se vzorek vyměnil za nový a hodnota se nastavila na 18,3 %. V tomto případě vzorek neprojevil žádnou reakci na otevřený oheň. Testování probíhalo vždy znovu v 15vteřinových cyklech, než se hodnota dostala na 18,6 %. V tomto případě vzorek projevilo reakci, ale kyslík v komínu byl nedostačující pro 180vteřinový test. Toto časové rozmezí testu splnil až vzorek s hodnotou 18,8 % kyslíku v komínu, kdy úbytek materiálu byl 11,43mm z 72,61mm, Tabulka 18, Samostatné přílohy.

Získaná data tohoto měření naznačují, že průhledné dřevo se vyznačuje nižší potřebou kyslíku v okolí, tedy vzplanutí materiálu je patřičně jednodušší. To může být způsobeno kombinací epoxydové pryskyřice a buničiny, nebo vyšší hustotou průhledného dřeva oproti dřevu bukovému, ale také změnou struktury delignifikací nebo nižším obsahem ligninu.

Lze tedy říci, že nižší potřeba kyslíku v okolí usnadňuje průhlednému dřevu vzplanutí, a to může vést k rychlejšímu šíření plamene. Pro hlubší pochopení protipožárních vlastností, mechanismů a následnou optimalizaci těchto vlastností je další výzkum průhledného dřeva nezbytně nutný, z hlediska požární bezpečnosti.

Jiří Militký (2012) popsal všechny materiály s *OI* vyšším než 26 % jako méně hořlavé materiály a s nižším *OI* než 21 % jako materiály, které hoří snadno. Na základě této klasifikace a výsledků, naměřených u průhledného dřeva, je tedy nutno tento materiál zařadit mezi snadno

hořlavé materiály, konkrétně mezi plastové fólie, které mají podobné výsledky za stejného měření dle norem BS 2782, část 141 (BS, 2011) a ISO 4589 (ISO, 2017).

7. Závěr

- Tato diplomová práce se zabývala komplexním zkoumáním vlastností průhledného dřeva s cílem posoudit jeho potenciální využití v architektuře, designu a jiných odvětvích.
- Teoretická část práce je zaměřena na veškeré aspekty výroby průhledného dřeva, popis potřebného materiálu a jeho možného využití v praxi. Na základě výzkumů jiných vědců je patrné, že průhledné dřevo je již v hledáčku několika různých odvětví, ať už energetických, stavebních, tak i designových. Z těchto teoretických poznatků tedy lze dedukovat, že v budoucnu se zvětší zájem o tento inovativní materiál.
- Praktická část byla zaměřena na samotnou výrobu průhledného dřeva (úspěšnou) a na testování jeho vlastností, a to konkrétně na pevnost v tlaku, tvrdost podle Brinella, optické vlastnosti a protipožární vlastnosti včetně zjištění kyslíkového čísla. Na základě naměřených hodnot a výsledků nelze jednoznačně říci, jestli je průhledné dřevo ve všech ohledech lepším, či do budoucna žádanějším materiálem oproti dřevu klasickému. Jako je tomu u jiných materiálů, každé má své využití pro konkrétní situace. Například, na základě výsledků této práce, by průhledné dřevo neobstálo v konstrukčních prvcích budov, vzhledem k jeho požárním vlastnostem. Naopak, ačkoliv je běžné dřevo velmi žádaným materiálem v designovém odvětví, může se průhledné dřevo stát unikátním prvkem v blízké budoucnosti. Jeho výhodou je primárně univerzálnost, a to ve slova smyslu nespočetného množství možných tvarů a rozměrů. To otevírá nové možnosti využití v interiérovém designu, ale i v tvorbě dekoračních předmětů. Optické vlastnosti tohoto materiálu jsou fascinující. Z naměřených hodnot lze považovat průhledné dřevo za de-facto průhledný materiál, což umožňuje například energetickým společnostem aplikovat průhledné dřevo v souvislosti se solárními panely.
- Je však potřeba se vlastnostem průhledného dřeva dále věnovat, ať už z pohledu dlouhodobé udržitelnosti tohoto materiálu, tak z pohledu recyklace a biotických a abiotických činitelů. Jak již bylo zmíněno, osobně věřím, že se v nedaleké budoucnosti budeme s tímto inovativním materiálem setkávat častěji, vzhledem k jeho potenciálnímu využití.

8. Literatura

BAJPAI, P. *Carbon Fibre from Lignin*. Singapore: Springer Verlag Singapore, 2017. ISBN 978-981-10-4228-7.

BUNGAY, H. Product opportunities for biomass refining. *Enzyme and Microbial Technology*. 1992, 14(6), 501–507. ISSN 1879-0909.

BURLAGE, R. S., HOOPER, S. W.; SAYLER, G. S. The TOL (pWWO) Catabolic Plasmid. *Applied and Environmental Microbiology*. 1989, 55(6), 1323–1328. ISSN 1070-6291.

CALVO-FLORES, F. G., DOBADO JIMÉNEZ, J.A.; GARCIA, J. I.; MARTÍN-MARTÍNEZ, F. J. *Lignin and lignans as renewable raw materials: chemistry, technology and applications*. West Sussex: John Wiley and Sons, 2015. ISBN 9781118597866.

ČERVENKA, E.; KRÁL, Z.; TOMIS, B. *Chemie dřeva a celulózy I-III*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1980.

FIRE-TESTING TECHNOLOGY. Oxygen Index. *Firetesting.com* [online]. © 2024 [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.fire-testing.com/oxygen-index/>

GEFFERT, A. *Chemické technológie dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2015. ISBN 978-80-228-2619-8.

GUSTAVSSON, C., SJÖSTRÖM, K.; AL-DAJANI, W. W. The influence of cooking conditions on the bleachability and chemical structure of kraft pulps. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*. 1999, 14(1), 71–81. ISSN 2000-0669.

HOLAN, J.; TESAŘOVÁ, D.; VAVRČÍK, H. *Dřevo v domácnosti. 1. vyd.* Brno: Vydavatelství ERA, 2006. ISBN 80-7366-049-0.

CHUNG, H.; WASHBURN, N. R. Chemistry of lignin-based materials. *Green Materials*. 2013, 1(3), 137–160. ISSN 2049-1220.

CHUTURRI, M.; GILLELA, S.; YADAV, S. M.; WIBOWO, E. S.; SIHAG, K.; RANGPPA, S. M.; BHUYAR, P.; SIENGCHIN, S.; ANTOV, P.; KRISTAK, L.; SINHA, A. A comprehensive review of the synthesis strategies, properties, and applications of transparent wood as a renewable and sustainable resource. *Science of The Total Environment*. 2023, 864, 161067. ISSN 0048-9697.

JEFFRIES, T. W. Utilization of xylose by bacteria, yeasts, and fungi. *Pentoses and Lignin*. 1983, 27, 1–32.

JUNGSTEDT, E.; MONTANARI, C.; ÖSTLUND, S.; BERGLUND, L. Mechanical properties of transparent high strength biocomposites from delignified wood veneer. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020, 133, 105853. ISSN 1359-835X.

KAČÍK, F.; JURČYKOVÁ, T. *Chemické zpracování dřeva*, Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2020. ISBN 978-80-213-2938-6.

KAČÍK, F.; SOLÁR, R. *Analytická chémia dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1999. ISBN 80-228-0882-0.

KIM, J.; YUN, S.; OUNAIES, Z. Discovery of Cellulose as a Smart Material. *Macromolecules*. 2006, 39, 4202-4206. ISSN 0024-9297.

KOCMAN, J. H. *Médium papír*. Brno: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4342-6.

KURT, C.; BITTNER, J. Sodium Hydroxide. In: ULLMANN, F. eds. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Hoboken: John Wiley & Sons, Ltd. 2006. ISBN 9783527303854.

LAPIERRE, L.; BERRY, R.; BOUCHARD, J. The effects of the order of chemical addition on the peroxide bleaching of an oxygen-delignified softwood kraft pulp. *Holzforschung*. 2000, 54(3), 279-286. ISSN 0018-3830.

LI, T.; ZHU, M.; YANG, Z.; JIANWEI, S.; DAI, J.; YAO, Y.; LUO, W.; PASTEL, G.; YANG, B. HU, L. Wood composite as an energy efficient building material: guided sunlight transmittance and effective thermal insulation. *Advanced Energy Materials*. 2016, 6(22), 1601122. ISSN 1614-6840.

LI, H.; GUO, X.; HE, Y.; ZHENG, R. House model with 2-5 cm thick translucent wood walls and its indoor light performance. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2019, 77, 843-851. ISSN 00183768.

MA, P.; GAN, Y.; ZHAI, H. 2013. Fractionated wheat straw lignin and its application as antioxidant. *BioResources*. 2013, 8(4), 5581-5595. ISSN 1930-2126.

MARTÍN-SAMPEDRO, R.; SANTOS, J. I.; FILLAT, Ú.; WICKLEIN, B.; EUGENIO, M. E.; IBARRA, D. Characterization of lignins from *Populus alba* L. generated as by-products in different transformation processes: Kraft pulping, organosolv and acid hydrolysis. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2019, 126, 18-29. ISSN 0141-8130.

MI, R.; CHEN, C.; KEPLINGER, T.; PIE, Y.; HE, S.; LIU, D.; LI, J.; DAI, J.; HITZ, E.; YANG, B.; BURGERT, I.; HU, L. Scalable aesthetic transparent wood for energy efficient buildings. *Nature Communications*, 2020, 11, 3836. ISSN 2041-1723.

MI, R.; LI, T.; DALGO, D.; CHEN, C.; KUANG, Y.; HE, S.; ZHAO, X.; XIE, W.; GAN, W.; ZHU, J.; SREBRIC, J.; YANG, R.; HU, L. A Clear, Strong, and Thermally Insulated Transparent Wood for Energy Efficient Windows. *Advanced Functional Materials*, 2019, 30(1), 1907511. ISSN 1616-301X.

MILITKÝ, J. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. Liberec: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.

MONTANARI, C.; OGAWA, Y.; OLSÉN, P.; BERGLUND, L. A. High Performance, Fully Bio-Based, and Optically Transparent Wood Biocomposites. *Advanced Science*. 2021, 8, 2100559. ISSN 2198-3844.

NEPAL, P.; JOHNSTOP, C.M.T.; GANGULY, I. Effects on Global Forests and Wood Product Markets of Increased Demand for Mass Timber. *Sustainability*. 2021, 13, 13943. ISSN 2071-1050.

PERELYGIN, L. M. *Náuka o dreve. 2. preprac. a dopl. vyd.* Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1965.

POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURJATKO, S.; BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Příklad, a. s., 1997. ISBN 80-07-00960-4.

RABEK, J. F. *Photostabilization of Polymers. Principles and Application of Food Science*. London: Elsevier applied science, 1990. ISBN 978-94-010-6821-5.

RESINSTUDIO. Epoxidová pryskyřice a příslušenství. *resinstudio.cz* [online]. © 2024 [cit. 2024-01-02]. Dostupné z: <https://www.resinstudio.cz/>

SAMANTA, A.; CHEN, H.; SAMANTA, P.; POPOV, S.; SYCHUGOV, I.; BERGLUND, L. A. Reversible dual-stimuli-responsive chromic transparent wood biocomposites for smart window applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021, 13(2), 3270-3277. ISSN 1944-8252.

SCHNEIDEROVÁ, P. Využití ligninu. *Kraftfutter*. 2004, 9, 278–280. ISSN 0023-4427.

SIEMENS, P. R.; GIAUQUE, W. F. Entropies of the hydrates of sodium hydroxide. II. Low-temperature heat capacities and heats of fusion of NaOH·2H₂O and NaOH·3.5H₂O. *The Journal of Physical Chemistry*. 1969, 73(1), 149-157. ISSN 1476-4687.

VANHOLME, R.; DEMEDTS, B.; MORREEL, K.; RALPH, J.; BOERJAN, W. Lignin Biosynthesis and Structure. *Plant Physiology*. 2010, 153, 895–905. ISSN 0032-0889.

WACHTER, I.; ŠTEFKO, T.; RANTUCH, P.; MARTINK, J.; PASTIEROVÁ, A. Effect of UV Radiation on Optical Properties and Hardness of Transparent Wood. *Polymers*. 2021, 13(13), 2067. ISSN 2073-4360.

WAGENFÜHR, R. *Dřevo – obrazový lexikon*. Praha: Grada Publishing a. s., 2002. ISBN 80-247-0346-7.

WANGAARD F. F. *Wood: Its Structure and Properties*. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 1981. ISBN 9781332216406.

WU, Y.; ZHOU, J.; HUANG, Q.; YANG, F.; WANG, Y.; LIANG, X.; LI, J. Study on the Colorimetry Properties of Transparent Wood Prepared from Six Wood Species. *ACS Omega*. 2020, 5, 1782–1788. ISSN 2470-1343.

XIA, Q.; CHEN, C.; LI, T.; HE, S.; GAO, J.; WANG, X.; HU, L. Solar-assisted fabrication of large-scale, patternable transparent wood. *Science Advances*. 2021a, 7(5), 1–21. ISSN 2375-2548.

XIA, R.; ZHANG, W.; YANG, Y.; ZHAO, J.; LIU, Y.; GUO, H. Transparent wood with phase change heat storage as novel green energy storage composites for building energy conservation. *Journal of Cleaner Production*. 2021b, 296, 126598. ISSN 1879-1786.

XU, W.; FANG, X.; HAN, J.; WU, Z.; ZHANG, J. Effect of coating thickness on sound absorption property of four wood species commonly used for piano soundboards. *Wood and Fiber Science*. 2020, 52(1), 28–43. ISSN 0735-6161.

ZEMANOVÁ, K. *Možnosti zpracování kalu z výroby papíru a celulózy*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce J. BORÁŇ.

ZHANG, L.; WANG, A.; ZHU, T.; CHEN, Z.; WU, Y.; GAO, Y. Transparent Wood Composites Fabricated by Impregnation of Epoxy Resin and W-Doped VO₂ Nanoparticles for Application in Energy-Saving Windows. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2020, 31(12), 34777–34783. ISSN 1944-8252.

ZHOU, J.; LIU, Y.; YANG, Z.; WANG, X.; LI, Y.; LIU, F.; JIANG, Z.; SUN, X.; LI, X.; ZHAO, Y.; WANG, C. HO, S-H.; YANG, H. Turing pattern-inspired highly transparent wood for multifunctional smart glass with superior thermal management and UV-blocking ability. *Advanced Sustainable Systems*. 2022, 6, 2200132. ISSN 2366-7486.

ZHU, H.; PARVINIAN, S.; PRESTON, C.; VAALAND, O.; RUAN, Z.; HU, L. Transparent nanopaper with tailored optical properties. *Nanoscale*. 2013, 5(9), 3787–3792. ISSN 2040-3364.

ZHU, M.W.; SONG, J.W.; LI, T.; GONG, A.; WANG, Y.B.; DAI, J.Q.; YAO, Y.G.; LUO, W.; HENDERSON, D.; HU, L.B. Highly Anisotropic, Highly Transparent Wood Composites. *Advanced Materials*. 2016, 28, 5181–5187. ISSN 0935-9648.

Normy

ISO 11664-6; *Colorimetry–Part 6: CIEDE2000 colour-difference formula*. International Organization for Standardization: London, United Kingdom, 2013

ISO 2470-1:2009 Paper, board and pulps – Measurement of diffuse blue reflectance factor (ISO brightness) - Indoor daylight conditions (ISO brightness), 2009

ISO 2470-2:2008 Paper, board and pulps. Measurement of diffuse blue reflectance factor. Part 2: Outdoor daylight conditions (D65 brightness), 2008

ISO 11475:2017 - Safety of machinery – Control devices, actuators and indicators - Ergonomic requirements and characteristics, 2017

ISO 5660-1:2015 - Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement), 2015

ISO 4589-2:2017 - Plastics - Determination of burning behaviour - Oxygen index method, 2017

ISO 6506-1:2020 - Metallic materials - Brinell hardness test - Part 1: Test method

ČSN EN 13501-1 (730860) Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň

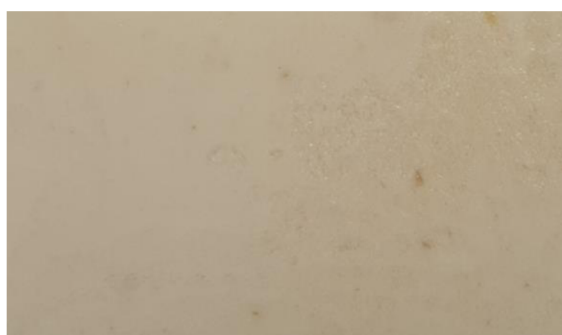
Seznam obrázků

OBRÁZEK 1 STRUKTURA LIGNOCELULÓZY (KIM ET AL., 2006)	12
OBRÁZEK 2 PROCENTUÁLNÍ ZASTOUPENÍ CELULÓZY, HEMICELULÓZY A LIGNINU (KIM ET AL., 2006)	13
OBRÁZEK 3 LIGNINOVÉ ALKOHOLY (P-KUMARYLALKOHOL, KONIFERYLALKOHOL A SINAPYLALKOHOL) (VANHOLME ET AL., 2010).....	15
OBRÁZEK 4 SCHEMATICKÝ NÁČRT ZNÁZORŇUJÍCÍ CHOVÁNÍ SVĚTLA SKRZ PRŮHLEDNÉ DŘEVO V RÁMCI VSTUPNÍHO PAPRSKU O INTENZITĚ DOPADAJÍCÍHO I: X – ABSORPCE, R – ODRAZ, BS – ZPĚTNÝ ROZPTYL, FS – DOPŘEDNÝ ROZPTYL, B – PAPRSEK ZACHOVÁVÁ SVŮJ PŮVODNÍ SMĚR BEZ VÝRAZNÉHO ROZPTYLU (CHUTTURI ET. AL., 2023)	21
OBRÁZEK 5 ART EPOXY FLUID 2.0.....	25
OBRÁZEK 6 FOTOLUMINISCENČNÍ PRÁŠKOVÝ PIGMENT – TYRKYS (RESINSTUDIO, 2024)	26
OBRÁZEK 7 VZORKY PODROBENÉ RŮZNÝM ČASŮM VÁREK (DELIGNIFIKACE).....	27
OBRÁZEK 8 VZORKY PODROBENÉ RŮZNÝM ČASŮM VÁREK (DELIGNIFIKACE).....	27
OBRÁZEK 9 HŘÍDELOVÁ MÍCHAČKA ZNAČKY WITEG	28
OBRÁZEK 10 HOTOVÉ VZORKY PRO TESTOVÁNÍ PRŮHLEDNÉHO DŘEVA.....	29
OBRÁZEK 11 FORMIČKY Z 3D TISKÁRNY PRO ZÍSKÁNÍ POŽADOVANÝCH ROZMĚRŮ PRŮHLEDNÉHO DŘEVA	29
OBRÁZEK 12 TIRA TEST 2850	30
OBRÁZEK 13 KÓNICKÝ KALORIMETR	32
OBRÁZEK 14 KYSLÍKOVÉ ČÍSLO (BUKOVÉ DŘEVO).....	35
OBRÁZEK 15 KYSLÍKOVÉ ČÍSLO (PRŮHLEDNÉ DŘEVO).....	35
OBRÁZEK 16 ZÁVISLOST SÍLY NA ČASE PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI V TLAKU – BUKOVÉ DŘEVO	36
OBRÁZEK 17 ZÁVISLOST SÍLY NA ČASE PŘI ZKOUŠCE PEVNOSTI V TLAKU – PRŮHLEDNÉ DŘEVO	36
OBRÁZEK 18 ZÁVISLOST SÍLY NA ČASE PŘI STANOVENÍ PEVNOSTI V TLAKU – POROVNÁNÍ.....	37
OBRÁZEK 19 MARHE BUKOVÉ DŘEVO (OSA X = ČAS, OSA Y = kW/M ²).....	42
OBRÁZEK 20 MARHE PRŮHLEDNÉ DŘEVO (OSA X = ČAS, OSA Y = kW/M ²).....	42
OBRÁZEK 21 PHRR BUKOVÉ DŘEVO (OSA X = ČAS, OSA Y = kW/M ²)	43
OBRÁZEK 22 PHRR PRŮHLEDNÉ DŘEVO (OSA X = ČAS, OSA Y = kW/M ²)	43
OBRÁZEK 23 KONCENTRACE O ₂ U VZORKŮ BUKOVÉHO DŘEVA V PRŮBĚHU TESTOVÁNÍ (OSA X = ČAS, OSA Y = %).....	44
OBRÁZEK 24 KONCENTRACE O ₂ U VZORKŮ PRŮHLEDNÉHO DŘEVA V PRŮBĚHU TESTOVÁNÍ (OSA X = ČAS, OSA Y = %)	44
OBRÁZEK 25 KONCENTRACE CO ₂ U VZORKŮ BUKOVÉHO DŘEVA V PRŮBĚHU TESTOVÁNÍ (OSA X = ČAS, OSA Y = %).....	45
OBRÁZEK 26 KONCENTRACE CO ₂ U VZORKŮ PRŮHLEDNÉHO DŘEVA V PRŮBĚHU TESTOVÁNÍ (OSA X = ČAS, OSA Y = %).....	45
OBRÁZEK 27 ÚBYTEK MATERIÁLU PŘI TESTOVÁNÍ U BUKOVÉHO DŘEVA (OSA X = ČAS (S), OSA Y = HMOTNOST (G)).....	46
OBRÁZEK 28 ÚBYTEK MATERIÁLU PŘI TESTOVÁNÍ U PRŮHLEDNÉHO DŘEVA (OSA X = ČAS (S), OSA Y = HMOTNOST (G))	46
OBRÁZEK 29 VZORKY PO TESTOVÁNÍ NA KÓNICKÉM KALORIMETRU	47

Samostatné přílohy

Tabulka 18 Rozměry pro zjištění kyslíkového čísla

Tabulka rozměrů pro OI							
Bukové dřevo				Průhledné dřevo			
a/mm	b/mm	c/mm	g	a/mm	b/mm	c/mm	g
10,10	9,96	73,25	5,4418	9,84	8,9	72,74	6,3093
9,82	9,65	70,48	4,6615	10,30	9,15	72,95	6,6719
9,98	9,85	73,86	5,5232	9,84	9,42	72,72	6,5555
10,13	9,99	73,11	5,0806	9,96	9,87	72,61	6,7479
10,08	9,84	73,8	5,0045	9,25	9,62	72,92	5,6738



Obrázek 30 Dusičnано-alkalická buková buničina 10% suspenze



Obrázek 31 Dusičnано-alkalická buková buničina 20% suspenze



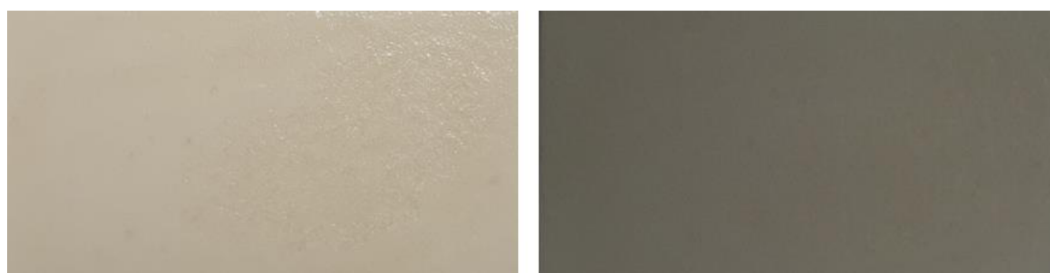
Obrázek 32 Dusičnано-alkalická buková buničina 40% suspenze



Obrázek 33 Dusičnано-alkalická buková buničina 10% suspenze 1% tyrkys



Obrázek 34 Dusičnано-alkalická buková buničina 10% suspenze 2% tyrkys



Obrázek 35 Dusičnано-alkalická buková buničina 10% suspenze 1% zeleň



Obrázek 36 Dusičnано-alkalická buková buničina 20% suspenze 1% tyrkys



Obrázek 37 Dusičnано-alkalická buková buničina 20% suspenze 1% zeleň



Obrázek 38 Sulfátová buničina 10% suspenze



Obrázek 39 Sulfátová buničina 20% suspenze



Obrázek 40 Sulfátová buničina 10% suspenze 1% tyrkys



Obrázek 41 Sulfátová buničina 10% suspenze 2% tyrkys



Obrázek 42 Sulfátová buničina 10% suspenze 1% zeleň



Obrázek 43 Natronová buničina 10% suspenze



Obrázek 44 Natronová buničina 20% suspenze



Obrázek 45 Natronová buničina 10% suspenze 1% tyrkys



Obrázek 46 Natronová buničina 10% suspenze 1% zeleň



Obrázek 47 Natronová buničina 20% suspenze 1% tyrkys



Obrázek 48 Natronová buničina 20% suspenze 1% zeleň