

**Česká zemědělská univerzita
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ**

**REAKCE NA OHEŇ ROSTLÉHO DŘEVA A DŘEVA TEPELNĚ
UPRAVENÉHO (THERMOWOODU®) OŠETŘENÉHO
ANTIPYRÉNY NA PŘÍRODNÍ BÁZI**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



2021

Česká zemědělská univerzita v Praze
**Fakulta lesnická
a dřevařská**

Natálie Dubská

ČESÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**REAKCE NA OHEŇ ROSTLÉHO DŘEVA A DŘEVA
TEPELNĚ UPRAVENÉHO (THERMOWOODU®)
OŠETŘENÉHO ANTIPYRÉNY NA PŘÍRODNÍ BÁZI**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Dřevařství

Pracoviště: Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Konzultant: Ing. Jiří Bouček

Praha 2021

Natálie Dubská

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Natálie Dubská

Dřevařství
Dřevařství

Název práce

Reakce na oheň rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného antipyrény na přírodní bázi

Název anglicky

Reaction to fire of grown wood and thermally modified wood (thermowood) modified with natural-based antipyrènes

Cíle práce

Základním cílem práce je ze-sumarizovat poznatky o vybraných požárních charakteristikách a jejich vlivu na rostlé a tepelně upravené dřevo ošetřené pomocí antipyrénů.

Druhá část práce je zaměřená na experimentální ověření získaných poznatků a jejich rozšíření vykonaným a vyhodnocením testů na vybraných dřevinách.

Metodika

1. Úvod (říjen 2020).
2. Analýza problematiky (listopad 2020):
 - vliv stupně termické modifikace na změny požárních vlastností různých druhů termicky modifikovaných dřevin,
 - vliv aplikace antipyrénů na požární vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.
3. Experimentální část (listopad 2020).
4. Měření (prosinec 2020).
5. Vyhodnocení (leden 2021).
6. Přínosy a doporučení (únor 2021).
7. Závěr (březen 2021).

Doporučený rozsah práce

80 stran

Klíčová slova

požární charakteristiky, antipyrén, thermowood

Doporučené zdroje informací

- Colour of Tropical Woods Influenced by Brown Rot [2019] Vidholdová. Zuzana Reinprecht. Ladislav Čekovská. H.. Gaff. M.. Osvaldová. L. M.. Kačík. F.. Kaplan. L.. & Kubš. J. (2017). *Tectona grandis* Linn. and its fire characteristics affected by the thermal modification of wood. *BioResources*. 12(2). 2805-2817.
- Kacikova, D., Kacik, F., Cabalova, I., and Durkovic, J. (2013). "Effects of thermal treatment on chemical, mechanical, and colour traits in Norway spruce wood," *Bioresource Technology* 144, 669. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.110
- Kačík. F.. Šmíra. P.. Kačíková. D.. Velková. V.. Nasswetrová. A.. Vacek. V. 2015. Chemical alterations of pine wood saccharides during heat sterilisation. In *Carbohydrate Polymers*. 117: 681
- Martinka, J., Chrebet, T., Král, J., and Balog, K. (2013a). "An examination of the behaviour of thermally treated spruce wood under fire conditions," *Wood Research* 58(4), 599-606.
- Tewarson, A. (1994). "Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation," *Journal of Fire Sciences* 12(4), 329-356. DOI: 10.1177/073490419401200401
- Xing, D., and Li, J. (2014). "Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of *Larix* spp. wood," *BioResources* 9(3), 4274-4287. DOI: 10.15376/biores.9.3.4274-4287
- Yinodotlgor, N., and Kartal, S. N. (2010). "Heat modification of wood: Chemical properties and resistance to mold and decay fungi," *Forest Products Journal* 60(4), 357-361.
-

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Jiří Bouček

Elektronicky schváleno dne 14. 7. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 19. 04. 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Reakce na oheň rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (Thermowoodu®) ošetřeného antipyrény na přírodní bázi vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. a konzultací Ing. Jiřího Boučka jsem použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědoma, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č.111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze, dne

.....

Natálie Dubská

Poděkování

Chtěla bych poděkovat mému vedoucímu panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. a konzultantovi panu Ing. Jiřímu Boučkovi. Za odborné vedení, správné nasměrování, trpělivost a cenné rady k vypracování bakalářské práce.

Abstrakt v rodném jazyce

Cílem této práce bylo vzájemné porovnání zjištěných poznatků k požární problematice dřeva rostlého a dřeva termicky modifikovaného, jak za použití přírodního antipyrénu, tak i bez něj. Testování, které probíhalo v experimentální části, mělo za cíl vzájemně porovnat zjištěné faktory, které měly zjistit vliv tepelné úpravy a vliv přírodního antipyrénu. Přírodní retardér je v dnešní době velmi využívaným prostředkem pro zlepšení reakce na oheň a zapalitelnost dřeva, a proto jsme se rozhodli pro jeho zkoumání.

Zkoušku na protipožární vlastnosti jsme prováděli na tropické dřevině Mahagon (*Swietenia mahagoni*). Celkový počet testovaných vzorků byl 40, ty jsme rozdělili na 20 vzorků ošetřených přírodním retardantem a zbylých 20 vzorků bez jakékoliv ochrany. Oba tyto soubory byly rozděleny na 4 podskupiny, dle jejich teploty termické úpravy (20 °C, 160 °C, 180 °C, 210 °C). Proces reakce dřeva vůči ohni jsme hodnotili pomocí kónického kalorimetru a každý vzorek zabral přibližně 30 minut za přímého kontaktu plamene.

Z výsledků vyplývá, že termická úprava měla statistický význam pouze u charakteristiky maximální rychlost hoření, zatím co u zbylých charakteristik (úbytek hmotnosti vlivem hoření, čas při dosažení maximální rychlosti hoření a rychlost úbytku hoření) se statistický vliv neprokázal. Z toho tedy vyplývá, že termická modifikace nezhoršuje ani nezlepšuje protipožární vlastnosti měřené dřeviny. Vliv antipyrénu se potvrdil jako prokazatelný s přibližně 10 % účinností. Vliv interakce retardéru a termické modifikace se nepotrdil jako statisticky významný.

Ze získaných chemických dat se potvrdila závislost na působení teploty, kdy došlo k nárustu extraktivních látek, ligninu a celulózy, zatím co u holocelulózy a hemicelulózy došlo k poklesu.

Klíčová slova: protipožární odolnost, antipyrén, ThermoWood

Abstrakt v cizím jazyce

The aim of this work was a mutual comparison of processed knowledge on fire issues of grown wood and thermally modified wood, both with the use of natural antipyrine and without it. The testing, which took place in the experimental part, was performed to compare the factors performed, which affect heat treatment and affect natural antipyrine. The natural retarder is nowadays a widely used means of improving the reaction to fire and the flammability of wood, which is why we chose it to study it.

We tested the fire protection properties on tropical mahogany (*Swietenia mahagoni*). The total number of tested samples was 40, we divided them into 20 samples treated with natural retardant and the remaining 20 samples without protection control. Both of these sets were divided into 4 subgroups, according to their heat treatment temperature (20 ° C, 160 ° C, 180 ° C, 210 ° C). The reaction process of the wood against which we evaluated using a conical calorimeter and each sample took another 30 minutes in direct contact with the flame.

The results show that the thermal treatment was statistically significant only for the characteristics of the maximum rotational speed, while for the remaining characteristics (weight loss due to rotation, time to reach maximum rotational speed and rate of loss of rotation) did not show a statistical effect. It follows that the thermal modification does not worsen or improve the fire protection properties of the measured tree species. The effect of antipyrine is confirmed to be demonstrable with approximately 10% efficacy. The effect of retarder interaction and thermal modification was not confirmed to be statistically significant.

From the obtained chemical data, confirm the dependence on the effect of temperature, when there was an increase in extractive substances, lignin and cellulose, so far there was a holocellulose and a hemicellulose decrease.

Keywords: fire resistance, antipyrine, ThermoWood

Obsah

Obsah	8
Seznam ilustrací	10
Seznam tabulek	12
Seznam zkratk a značek	13
Úvod	14
1 Cíl práce.....	16
2 Analýza poznatků k řešené problematice	17
2.1 Dřevo.....	17
2.1.1. Chemické složení dřeva	18
2.1.1.1 Celulóza	19
2.1.1.2 Hemicelulóza	20
2.1.1.3 Lignin.....	20
2.1.1.4 Doprovodné látky	21
2.2. Vliv termické modifikace na chemické složení dřeva	21
3.1 Termicky modifikované dřevo.....	22
3.1.1 Technologie výroby termicky modifikovaného dřeva	22
3.1.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky upraveného dřeva	25
3.1.2.1 Hygroskopicita.....	25
3.1.2.2 Rozměrová stálost.....	26
3.1.2.3 Pevnost, houževnatost a tvrdost.....	26
3.1.3 Protipožární vlastnosti termicky upraveného dřeva.....	27
4.1 Proces hoření dřeva.....	27
4.1.1 Vliv vzdušného kyslíku na proces hoření	28
4.1.2 Charakteristika hoření dřeva	30
4.1.3 Charakteristika plamene	31
4.1.3.1 Teplota plamene.....	31
4.1.3.2 Šíření plamene	32
4.1.4 Fáze rozkladu dřeva (termická analýza).....	33
4.1.5 Termická degradace polysacharidů a ligninu.....	35
4.1.5.1 Termická degradace hemicelulózy	36

4.1.5.2 Termická degradace celulózy	36
4.1.5.3 Termická degradace ligninu.....	36
5.1 Ochrana dřeva proti hoření	37
5.1.1 Druhy protipožární úpravy dřeva	38
5.1.2 Retardanty hoření	39
5.1.2.1 Druhy retardantů hoření.....	40
5.1.2.2 Aplikace retardantů.....	43
5.1.2.3 Vliv na životní prostředí	44
6 Metodika	45
7 Experimentální část	46
7.1 Příprava zkušebních těles.....	46
7.2 Označení zkušebních těles	46
7.3 Přeměření a vážení vzorků.....	47
7.4 Úprava termickou modifikací těles	47
7.5 Chemická analýza vzorků	47
7.6 Aplikace přírodního retardantu	48
7.7 Testování požární odolnosti	48
7.7.1 Skladba kónického kalorimetru.....	49
7.7.2 Kalibrace kónického kalorimetru	49
7.8 Vyhodnocení naměřených dat.....	51
8 Výsledky.....	52
8.1 Úbytek hmotnosti vlivem hoření.....	52
8.2 Čas při dosažení maximální rychlosti $q(A, \max)$ (S)	54
8.3 Maximální rychlost hoření	56
8.4 Rychlost úbytku hmotnosti.....	58
8.5 Chemická analýza	60
9 Diskuze.....	66
10 Závěr	68
Citovaná literatura	69

Seznam ilustrací

Obr. 1 Stavba buněčné stěny složena hlavními chemickými složkami (Straka, 2006).....	19
Obr. 2 Makromolekula celulózy (Česká zemědělská univerzita).....	19
Obr. 3 Pentóza – ribosa (Darling, 2016)	20
Obr. 4 Hezózy – D-Allóza, L-Allóza (Wikipedie, 2019).....	20
Obr. 5 Vzorec ligninu (Murtinger, 2006).....	20
Obr. 6 Zastoupení hlavních složek dřeva u jehličnatých a listnatých dřevin (Česká zemědělská univerzita)	21
Obr. 7 Proces výroby pro ThermoWood (Dejmal, 2012)	23
Obr. 8 Změna modulu pevnosti a pružnosti v čase způsobená působením vysokých teplot (Hill, 2006)	27
Obr. 9 Trojúhelník hoření (Uhrová, 2013).....	28
Obr. 10 Reakce vzdušného kyslíku se dřevem (Kubesa, a další, 2012).....	29
Obr. 11 Průběh rychlosti hoření dřeva při vzduchovém režimu (Kubesa, a další, 2012)	30
Obr. 12 Schéma hoření dřeva (Švec, 2016)	34
Obr. 13 Přehled energetických efektů při termickém rozkladu dřeva a jeho složek (entotermická reakce - ENDO, exotermická reakce - EXO) (Reinprecht, 2008)	35
Obr. 14 Zobrazení principu termického rozkladu a hoření celulózy (Reinprecht, 2008).....	36
Obr. 15 Porovnání mezi dřevem neupraveným a dřevem ošetřeným anorganickými retardéry (Tang, a další, 1968).	39
Obr. 16 Graf znázorňující závislost termické modifikace na čase	47
Obr. 17 Aplikace přírodního retardéru hoření na dřevinu mahagon	48
Obr. 18 Schéma kónického kalorimetru (Najmanová, a další, 2015)	49
Obr. 19 Měření požární odolnosti na kónickém kalorimetru	50
Obr. 20 Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace, retardéru hoření a jejich interakce na hodnoty úbytku hmotnosti.....	54
Obr. 21 Graf označující 95 % interval spolehlivosti hodnotící účinek termické modifikace, retardéru hoření a jejich interakce na hodnoty času dosažené při maximální teploty hoření	56
Obr. 21 Graf označující 95 % interval spolehlivosti hodnotící účinek termické modifikace, retardéru hoření a jejich interakce na hodnoty maximální teploty hoření	58
Obr. 22 Graf označující 95 % interval spolehlivosti hodnotící účinek termické modifikace, retardéru hoření a jejich interakce na hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti.....	60
Obr. 24: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu extraktivních látek	63
Obr. 25: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu množství ligninu	63
Obr. 26: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu množství holocelulózy.....	64

Obr. 27: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnocení účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu množství celulózy	64
Obr. 28: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnocení účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu množství hemicelulózy	65

Seznam tabulek

Tab. 1 Procentuální podíl prvků ve dřevě (Adámek, 2004)	18
Tab. 2 Znázornění času vzplanutí v závislosti na druhu dřeviny a působení teploty (dashofer.cz, 2009)	31
Tab. 3 Porovnání rychlosti hoření mezi tuhými materiály (Bučko, a další, 1997)	32
Tab. 4 Zobrazení fází hoření dřeva za určitých teplot (Reinprecht, 2001)	37
Tab. 5 Průměrné hodnoty hustoty před termickou modifikací a po termické modifikaci.....	52
Tab. 6 Průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro úbytek hmotnosti vlivem hoření	52
Tab. 7 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na úbytek hmotnosti	53
Tab. 8 Průměrné hodnoty s variačním koeficientem na čas maximální rychlosti q (A, max) (S)	55
Tab. 9 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na čas při maximální rychlosti hoření	55
Tab. 10 Průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro maximální rychlost hoření	57
Tab. 11 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na maximální rychlost hoření.....	57
Tab. 12 Průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro rychlost úbytku hmotnosti vlivem hoření.....	59
Tab. 13 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na rychlost úbytku hmotnosti	59
Tab. 14 Průměrné hodnoty s korelačním koeficientem (CV %).....	60
Tab. 15 Jedno-faktorová analýza rozptylu hodnotící účinek teploty na hodnoty změn chemických složek dřeva	61
Tab. 16 Průměrné hodnoty charakteristik hoření v závislosti na chemickém složení dřeva (%).....	62

Seznam zkratk a značek

- MOR - pevnost dřeva ve statickém pohybu
OH - chemická skupina obsahující jeden atom kyslíku a vodíku
OHT - tepelně upravené dřevo za pomoci přírodních olejů

Úvod

Dřevo je velmi důležitý přírodní materiál, který člověka provází odnepaměti. Jeho využití má velké množství podob, které se vyskytuje zejména v oborech stavebnictví, nábytkářství nebo v hudebním a sportovním odvětví. Je to zejména díky svým dobrým vlastnostem, mezi které řadíme snadné zpracování, dobré vztahy mezi pevností a hmotností, jeho příjemný vizuální vzhled a zejména, že se jedná o ekologický přírodní materiál, který spadá do obnovitelných materiálů. Dřevo má však i své značné nevýhody, mezi které řadíme napadení biotickými škůdci, tedy napadením dřevokazným hmyzem, houbami a plísněmi, napadením abiotickými činiteli, do kterých řadíme poškození vlivem povětrnostních vlivů a působení sněhové pokrývky či námrazy a další jeho neméně podstatnou zápornou vlastností je jeho snadná zápalnost a hořlavost. Právě tato záporná vlastnost zápalnost a hořlavost patří k nejvíce vyzdvihovaným nežádoucím vlastnostem v oboru stavebnictví. Poslední dobou se zvyšuje úsilí o využití přírodních obnovitelných materiálů od materiálu, které za sebou nechávají nemalou uhlíkovou stopu. Tyto přírodní materiály však mají své záporné vlastnosti, které jsme si již zmínili, a proto se klade větší důraz na výzkum pro zmírnění či úplné odstranění těchto negativních vlastností.

Jak již bylo zmíněno, dřevo je stavební prvek, který je využíván po celém světě. V současné době se však zvýšil zájem o dřevostavby, dřevěné venkovní obklady, terasy a podobně. Vzhledem k tomu, že dřevo spadá mezi materiály, které nejvíce podléhají ohni je důležité se zaměřit na prodloužení životnosti dřevěných konstrukcí a prvků, a to zejména z pohledu požární bezpečnosti pro ochranu lidského zdraví. Dřevo je možné ochránit proti požáru různými ochrannými prostředky, ať už se jedná o konstrukční metody nebo speciální ochranné nátěry, které se vyrábějí jak ze syntetických látek, tak z přírodních, a právě o tyto přírodní prostředky se v následující práci zajímat, kvůli jejich zdravotní a ekologické nezávadnosti.

S využitím dřevěných materiálů přišla i jeho inovace v podobě termické úpravy, která se v poslední době stala velmi žádanou a známou pod názvem ThermoWood. Díky této úpravě dřevo lépe odolává působení biotickým a abiotickým činitelům, při ponechání pozitivních vlastností.

Tato práce se zabývá zmíněnou problematikou zasahující do požární bezpečnosti, a to tedy vlivu ohně a odolnost dřeva vůči němu u dřeva rostlého a dřeva termicky

upraveného za použití přírodního retardéru a bez jeho použití. V této práci jsme porovnávali tyto možnosti použití dřeviny při použití ochrany proti hoření (antipyrénu) za účelem získání nového pohledu na možné rozšíření použití dřeva.

1 Cíl práce

První částí této práce bylo shromáždit literární poznatky k dané problematice, tedy pochopitelně seskupit a popsat informace k požární charakteristice a jejich vliv na rostlé a termicky modifikované dřevo (thermowood®) ošetřené antipyrénem na přírodní bázi či bez jeho použití.

Ke zjištění tohoto cíle bylo nutné provést testování experimentálních vzorků, které jsou zhotoveny ze dřeviny mahagon. Testování probíhalo na kónickém kalorimetru, který zaznamenává a vyhodnocuje jeho změnu hmotnosti, čas vzplanutí, maximální působící teplotu, rychlost hoření apod. Tímto jsme získali potřebná data ke zjištění účinku retardéru na vybrané požární charakteristiky, které budeme porovnávat s hodnotami dřevěných vzorků bez použití přírodního antipyrénu. Dále jsme zjišťovali účinky teploty termické modifikace na hodnoty chemických komponentů dřeva (celulóza, hemicelulóza a lignin).

K vyhodnocení práce je zapotřebí porovnat a statisticky potvrdit rozdíly mezi požární odolností rostlého dřeva bez jakékoli úpravy a dřeva, které bylo ošetřeno pomocí termické modifikace (thermowood®) a následně ošetřené přírodním retardérem či bez jeho použití. Porovnávali jsme samotný vliv antipyrénu, termickou modifikaci a interakci termické modifikace a retardéru hoření na hodnoty reakce na oheň.

Tato práce má za úkol zajistit přínos pro přiblížení do probírané problematiky a možné využití do praktického použití či k dalšímu vývoji nových ochranných látek.

2 Analýza poznatků k řešené problematice

V současné době, jak již bylo zmíněno, je dřevo jeden z nejvíce používaných materiálů na světě, bylo tomu již kdysi a bude tomu i nadále. S dobou však přicházejí jeho inovace, které daly za vznik dřevu termicky upravenému, tedy thermowoodu, o který je stále větší zájem, především díky jeho prodloužené životnosti, odolnosti vůči biotickým a abiotickým činitelům a v neposlední řadě díky jeho relativně nenáročným a ekologickým způsobem výroby. S dobou přichází zamyšlení se nad ekologickým způsobem žití, což se značně začíná projevovat i ve stavebním průmyslu, kde můžeme zpozorovat vývoj oproti minulým let, kdy se preferovaly stavby spíše z betonu a železa se do popředí dostávají konstrukce dřevěné. Tím přichází myšlenka k protipožární ochraně. V současné době si s hořlavostí dřeva stále neumíme zcela poradit a stále se vyvíjejí nové metody jeho ochrany. Odolnost dřeva vůči ohni se dá zvyšovat různými způsoby úprav, mezi kterými je způsob úpravy pomocí impregnací přírodními či syntetickými retardéry, které jsou v této době velice žádané.

2.1 Dřevo

Dřevo je přírodní, anizotropní materiál, který spadá pod kategorii obnovitelných přírodních zdrojů. Stejně jako u jiných zdrojů chceme zajistit, aby naše surové materiály byly vyráběny a používány udržitelným způsobem. Pokud budou dodrženy postupy udržitelného obhospodařování lesů a těžby, bude náš zdroj dřeva k dispozici neomezeně dlouho (Rowell, 2013). Obnovovací potenciál dřeva v lesích je mimořádný. Rozlohou lesy v Českých zemích zaujímají 34 % plochy z celkové plochy České republiky. Zajímavostí je, nejvíce zalesněným státem Evropy je Finsko s rozlohou 73 % a naopak s nejnižší zalesněnou plochou zaujímají ve státech Velká Británie a Nizozemí 11 %. Globálně lesy zaujímají přibližně 25 % celkové plochy na Zemi (LIVING FUTURE, 2018).

Se dřevem, ať rostlým nebo nějakým způsobem upraveným se můžeme setkat téměř kdekoliv. Využívá se pro své dobré mechanické vlastnosti, mezi které řadíme zejména jeho pružnost, pevnost a tvrdost a fyzikální vlastnosti, které charakterizují dřevo z hlediska jeho hlavních vnějších i vnitřních vlastností, to je například jeho barva, textura,

hustota, a z pohledu na jeho reakce na různé fyzikální jevy, jako jsou vlhkost, teplo, zvuk, aj.

2.1.1. Chemické složení dřeva

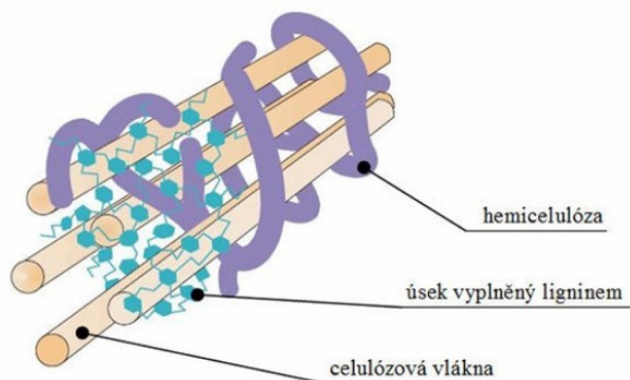
U chemického složení dřeva se procentuální podíl prvků jak u jehličnatých, tak listnatých stromů téměř neliší. Číselný podíl hlavních prvků je zobrazen v tabulce 1. Mimo zmíněné prvky v tabulce se ve dřevě vyskytují i další prvky, jejichž podíl ve dřevě je zanedbatelný. Výjimku však tvoří exotické dřeviny, které zaujímají až 3,5 % extraktivních látek (Jankovský, a další, 1999).

Tab. 1 Procentuální podíl prvků ve dřevě (Adámek, 2004)

Uhlík	49,5
Kyslík	44,2
Vodík	6,3
Dusík	0,2-1,5

Podstatná část dřeva se skládá z organických látek, které můžeme dělit na hlavní složky dřeva a doprovodné složky. Hlavní chemické složky jsou tvořeny polymery, které tvoří buněčnou stěnu a zaujímají 90-97 % dřevní hmoty. Jedná se o lignin a sacharidy, které dále dělíme na celulózu a hemicelulózu. Lignin dřevu zajišťuje pevnost v tlaku a sacharidová část dřeva tvoří samotnou kostru buněčné stěny. Stavba buněčné stěny tvořena hlavními chemickými složkami je zobrazena na Obrázku 1 (Jankovský a kolektiv 1999).

Doprovodné látky označujeme jako extraktivní látky a zaujímají 3-10 % dřevní hmoty. Tyto látky se nepodílí na tvorbě buněčných stěn. Vyskytují se v buněčných stěnách, lumenech nebo mezibuněčných prostorech. Tvoří je převážně dutiny organických složek (pektiny, pryskyřice, tuky, vosky, bílkoviny apod.) a anorganické složky (Jankovský, a další, 1999;).

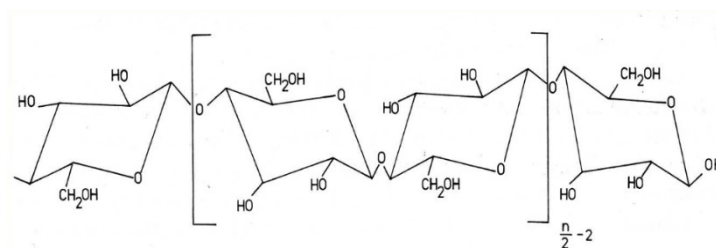


Obr. 1 Stavba buněčné stěny složena hlavními chemickými složkami (Straka, 2006)

Anorganické látky se ve dřevě vyskytují jen v malém množství, které se odvíjí od druhu dřeviny, struktury půdy, stáří a části stromu. Vyskytují se zejména soli draslíku, křemíku, sodíku, vápníku, železa, manganu a uhlíku. Anorganické minerální látky tvoří po spálení dřeva popel, který představuje 0,2 – 0,6 % (Jankovský a kolektiv 1999; Kačíková, a další, 2006).

2.1.1.1 Celulóza

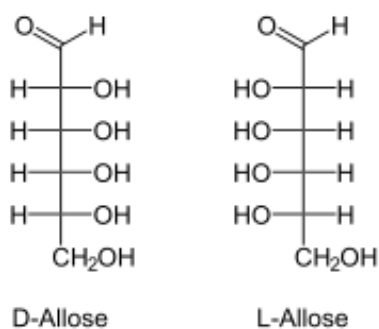
Celulóza zaujímá největší zastoupení organických látek ve dřevě. U listnatých dřevin se vyskytuje v rozmezích 41-48 % a u jehličnatých 46-55 %. Celulóza je polysacharid, který tvoří kostru zdřevnatělých buněčných stěn, jejichž základní stavební složkou je beta-D-glukóza, viz. Obrázek 2. Polymerizační stupeň se pohybuje v hodnotách 5-14 tisíc a udává nám, z kolika stavebních nebo strukturních jednotek se tvoří makromolekula celulózy. Vznik samotné makromolekuly spočívá ve vzájemném spojení dvou stavebních jednotek, postupným spojováním dalších prvků makromolekul celulózy se tvoří řetězec. Makromolekulu celulózy zobrazuje Obrázek 3. Vyšší podíl celulózy má za následek vyšší hustotu, pružnost, pevnost v tahu a rozměrovou stabilitu (Jankovský, a další, 1999).



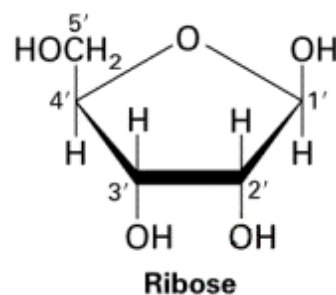
Obr. 2 Makromolekula celulózy (Česká zemědělská univerzita)

2.1.1.2 Hemicelulóza

Jedná se jako u celulózy o polysacharid s polymerizačním stupněm 100 až 200. Tvoří tmelící složku mezi vláknitými strukturami celulózy a ligninem. Řetězce jsou tvořeny z beta-D glukopyranózy a dalších monosacharidů (hexózy a pentózy), které jsou znázorněny na Obrázku 4 a 5. Podíl hemicelulózy se u jehličnatých dřevin pohybuje mezi 15-25 % a u listnatých dřevin mezi 25-35 % (Jankovský, a další, 1999).



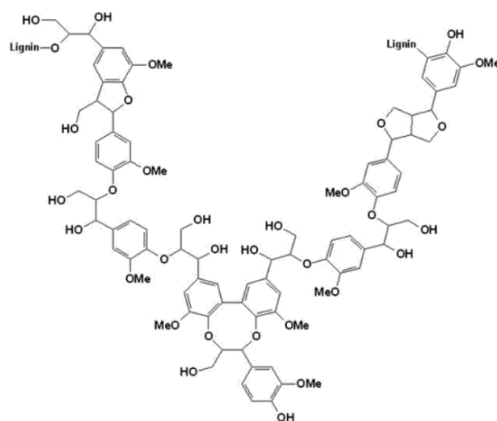
Obr. 4 Hezózy – D-Allóza, L-Allóza (Wikipedie, 2019)



Obr. 3 Pentóza – ribosa (Darling, 2016)

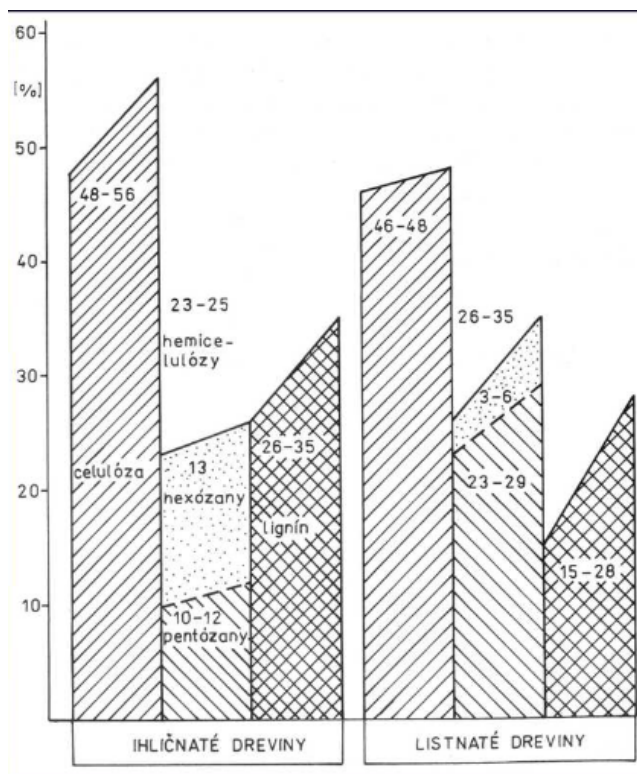
2.1.1.3 Lignin

Je za celulózu nejdůležitějším a nejvíce zastoupeným polymerem. U listnatých dřevin se vyskytuje mezi 20-30 % a u jehličnatých mezi 25-35 %. Lignin způsobuje dřevnatění a po ukončení růstu dřeva se ukládá v buněčných stěnách. Lignin dřevu zajišťuje pevnost, ale zároveň omezuje jeho pružnost. Jedná se o rozvětvený beztvary polymer, který se skládá z aromatických alkoholů (Rowell, a další, 2012).



Obr. 5 Vzorec ligninu (Murtinger, 2006)

Celkový poměr zastoupení výše zmíněných hlavních složek ve dřevě je znázorněn na
Obrázku 6.



Obr. 6 Zastoupení hlavních složek dřeva u jehličnatých a listnatých dřevin (Česká zemědělská univerzita)

2.1.1.4 Doprovodné látky

Naše dřeviny obsahují pouze malé množství doprovodných látek, a to v rozmezí 1-5 % u exotických dřevin je však toto procento vyšší, a to až na 30 %. Tyto doprovodné složky plní ve dřevě funkci zásobovací a ochranou. Na rozdíl od hlavních složek jsou extraktivní látky rozpustné ve vodě či nepolárních organických rozpouštědlech (Jankovský, a další, 1999; Kačíková, a další, 2006).

2.2. Vliv termické modifikace na chemické složení dřeva

Součástí tepelné modifikace dřeva je přeměna jeho chemické struktury, kdy dochází k následujícím dějům (Reinprecht, a další, 2008):

- k blokaci hydroxylových-OH funkčních skupin dřeva, což má za následek snížení hygroskopicity a ustálení rozměrů dřeva,

-
- vznik polykondenzační reakce v ligninové matici dřeva, který má také za následek snížení hygroskopicity a vznik látek odolávajících vůči napadení biologickými škůdci,
 - vznik stabilních usazených zplodin, které vznikají z ligninosacharidické matrice a extrahovaných složek dřeva, které dodávají dřevu odolnost vůči napadání různými organizmy, mezi které patří dřevokazná plíseň, houby nebo hmyz,
 - probíhají změny ve složení hemicelulózy a vybraných extrahovatelných látek dřeva (Kretschmann, a další, 1997).

3.1 Termicky modifikované dřevo

Termická modifikace dřeva se řadí mezi nejjednodušší a relativně nejlevnější úpravu dřeva. Termicky upravené dřevo všeobecně nazýváme pod názvem thermowood. Tento způsob úpravy dřeva se začal vyrábět již koncem 19. století ve Finsku pod obchodním názvem Thermowood. Postupně se rozšířil do Evropy, zejména do Německa, Francie, Rakouska a Holandska. Hlavním cílem je upravit domácí, snadno dostupné dřeviny v materiál, který svými vlastnostmi bude podobný trvanlivějším a odolnějším dřevinám jako jsou například exotické dřeviny. Při úpravě se zachovávají důležité vlastnosti dřeva, jako jsou například pevnost a tvrdost a odstraňují se negativní vlastnosti, mezi které řadíme rozměrové změny, napadení biotickými a abiotickými činiteli (Esteves, a další, 2009).

3.1.1 Technologie výroby termicky modifikovaného dřeva

Celý proces výroby spočívá za použití vysokých teplot v rozmezí od 150 °C do 260 °C, v závislosti na druhu dřeviny, při kterých vzniká změna vnitřní chemické struktury a změna fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Jedná se o šetrnou modifikaci dřeva vůči přírodě bez použití škodlivých látek, jde tedy o zcela ekologický proces výroby (Esteves, a další, 2009).

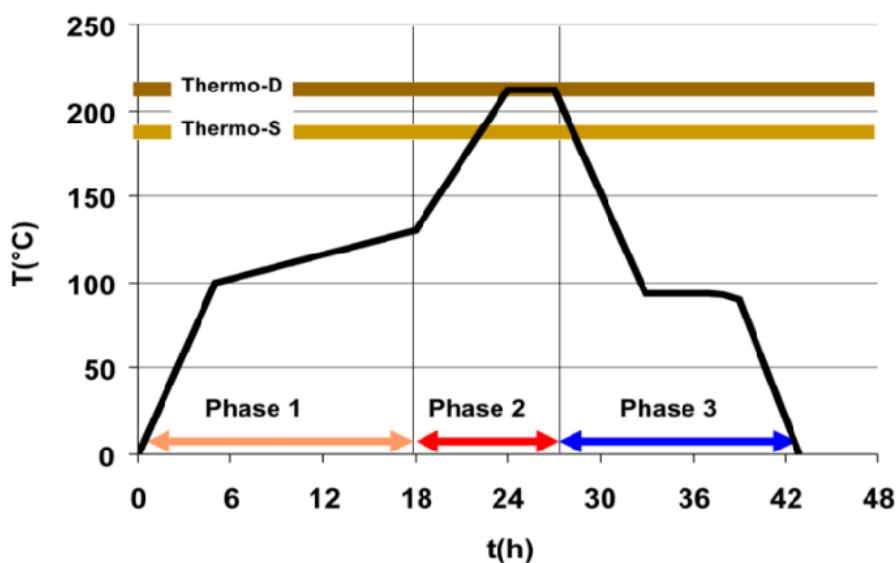
Výrobní procesy termicky upraveného dřeva se dají provést několika technologiemi, přičemž při každém postupu výroby je dosahováno vysokých teplot. Nejpoužívanější technologie termicky upraveného dřeva se rozkládají do pěti procesů, které si znázorníme níže.

a) ThermoWood®

Jedná se o nejpoužívanější proces tepelné úpravy dřeva, který pochází z Finska.

Postup pro výrobu ThermoWoodu se dělí do tří etap:

- Ohřev a vysokoteplotní sušení – v první kroku je teplota v dané komoře zprudka zvýšená na 100 °C následně se teplota postupně zvyšuje na 130 °C za působení horkého vzduchu či vodní páry. Během sušení se vlhkost dřeva sníží na nulu. Délka tohoto procesu je závislá na druhu dřeviny, počáteční vlhkosti a rozměrech materiálu, přibližně trvá 24-48 hodin.
- Termická úprava – následuje zvýšení teploty na požadovanou hodnotu 180-215 °C po dobu 2-3 hodin. Během této úpravy je do komory přiváděná pára, která zamezuje samovolnému vznícení.
- Ohlazování a úprava vlhkosti – v poslední úpravě dochází k postupnému ochlazování na teplotu 80-90 °C a zároveň dochází ke zvýšení vlhkosti za pomoci rozprašování vody v komoře na požadovanou vlhkost 4-7 %. Konečná etapa trvá přibližně 5-15 hodin (Reinprecht, 2008).



Obr. 7 Proces výroby pro ThermoWood (Dejmal, 2012)

b) Plato® Wood

Jedná se o výrobní proces používaný v Nizozemsku. Pro výrobu se nejčastěji používají dřeviny: smrk a v menší míře jedle, topol nebo borovice.

Postup pro výrobu Plato® Wood se dělí do čtyř etap:

-
- Hydrotermická úprava – v první etapě je řezivo ohříváno nasycenou párou při tlaku 0,6 – 0,9 MPa na teplotu 150–180 °C. Doba této etapy se odvíjí od velikosti, druhu a celkového objemu řeziva. Čas trvání je 4-5 hodin.
 - Vysušení – řezivo je následně uloženo ke schnutí na požadovanou vlhkost 8-10 % po dobu až tři týdny.
 - Vytvrzování – po vysušení dřeviny na požadovanou vlhkost dochází k jeho ohřevu o teplotě 150-190 °C a atmosférickém tlaku. Vlhkost dřeva klesne přibližně na 1 % při zamezení vstupu kyslíku. Při tomto procesu se doba trvání pohybuje v rozmezí 12-16 hodin.
 - Klimatizování – poslední proces spočívá v postupném zvlhčováním dřeva na vlhkost 3-5 % do doby 3 dnů (Reinprecht, 2008).

c) OHT proces

OHT proces tepelné modifikace používaný v Německu probíhá v impregnační komoře za přítomnosti působení vysokých teplot v rozmezí 180-260 °C a za použití horkého rostlinného oleje. Olej slouží pro prostup tepla do dřeva a zároveň zabraňuje vstupu kyslíku, který způsobuje nechtěné termooxidační reakce. Proces trvá po dobu 2-4 hodin při působení stabilní teploty okolo 200 °C (Lee, a další, 2018).

d) Rétifacation

Retifikační proces vyvinutý ve Francii spočívá v předsušení řeziva na 12 % vlhkost a následném postupném ohřívání dřeva v interním prostředí dusíku na teplotu 210-260 °C. Při této teplotě a nízkém procentu kyslíku je dřevo zčásti pyrolyzováno a zároveň je zamezeno probíhání termooxidačních dějů. Celý tento proces trvá přibližně 7-14 hodin (Kocaeffe, a další, 2008).

e) Le Bois Perdure

Proces termické úpravy vyvinutý ve Francii začíná vysušením řeziva v čerstvém stavu a následném ohřívání na teplotu 200-230 °C. Tento proces probíhá v komoře za působení páry, která se vytváří z unikající vlhkosti. Výroba zabere 12-18 hodin pracovního procesu (Vernois, 2000).

3.1.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti termicky upraveného dřeva

Vlivem termické úpravy dřeva dochází k přeměně fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. U změn fyzikálních dochází k jasnému poklesu koeficientu bobtnání a sesychání, nastává tedy rozměrová stálost a zároveň se výrazně mění rovnovážná vlhkost dřeva tedy jeho hygroskopicita (Korkut, a další, 2008).

Termická modifikace probíhá v rozmezí od 150 °C do 280 °C, dalo by se říct, že čím vyšší teplota, tím vznikají lepší vlastnosti dřeva z pohledu na jeho ochranu (Xu, a další, 2019). Nevýhodou však je, že u změn mechanických pocítujeme snížení pevnosti, tvrdosti a houževnatosti dřeva, ta klesne přibližně až o 25 % až 30 %. Při působení vyšších teplot je tento rozdíl znatelnější (Xu, a další, 2019).

3.1.2.1 Hygroskopicita

Při termických procesech úpravy dřeva za vysokých teplot dochází ke snížení hygroskopicity (Li, a další, 2017). Jedná se o schopnost dřeva měnit svou vlhkost podle podmínek okolního prostředí. U této termické modifikace je snížena schopnost absorpce vlhkosti až o 50 %, výsledkem této úpravy je rovnovážná vlhkost upravena na stabilních 5-7 %. Tato schopnost dřeva je velice důležitou vlastností, která má velký vliv i na jeho další vlastnosti, zejména pak na jeho rozměrovou stálost a odolnost vůči působení biotických a abiotických činitelů (Borrega, a další, 2010).

Termicky modifikované dřevo a jeho snížení hygroskopicity lze odůvodnit níže zmíněnými jevy (Barčík, a další, 2004):

- z důvodu rozkladu určité části hemicelulóz ve dřevě,
- odstraněním či prostorovou distancí hydrofobních – OH skupin (chemická skupina obsahující jeden atom kyslíku a vodíku),
- přemísťováním a rozdělováním lipidních i jiných hydrofobních složek ve dřevě (Kubiš, 2019).

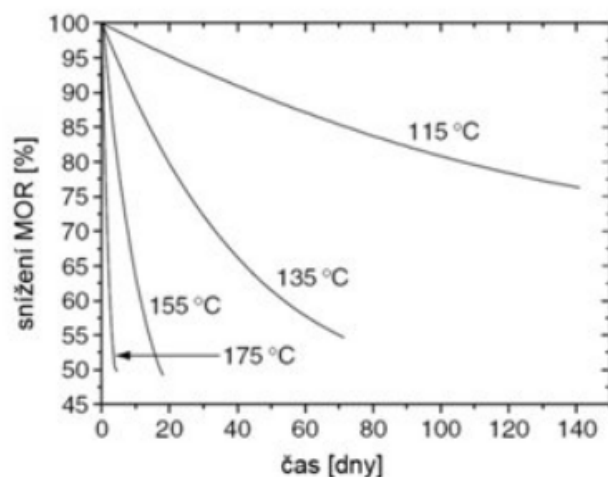
3.1.2.2 Rozměrová stálost

Rozměrová stabilita je u termicky modifikovaného dřeva lepší než u dřeva neupraveného. Jde o vlastnost, kdy se při změnách relativní vlhkosti okolního vzduchu nemění rozměry dřeva tedy nedochází k jeho bobtnání a sesychání, která mají za následek u neupraveného dřeva porušení vnitřní struktury (Korkut, a další, 2013). Prokázalo se, že se rozměrová stabilita zvýší v radiálním a tangenciálním směru okolo 88 % až 96 % (Xu, a další, 2019).

3.1.2.3 Pevnost, houževnatost a tvrdost

Pevnost a rázová houževnatost dřeva je zásadně ovlivněná termickou modifikací, která je závislá na stupni úpravy a stavební struktuře dřeva. Při změně struktury dochází k degradaci matice buněčné stěny hemicelulóz i dalších látkách modifikovaného dřeva v závislosti na jeho druhu. Zásadní přeměny zmíněných mechanických vlastností jsou ovlivněny zejména zvolenou výškou teploty v závislosti na době působení teploty. Obecně při výrobě termicky modifikovaného dřeva platí, že teplota nesmí dlouhodobě překročit teplotu 220 °C a zároveň zamezit přístupu kyslíku (Budakci, a další, 2013) (Dilik, a další, 2012).

Na obrázku 8 je znázorněn graf, ze kterého vyplývá, že se zvyšující se teplotou a dobou procesu modifikace pevnost a tvrdost klesá. Snížení pevnosti se objasňuje i poklesem hustoty nebo nerovnoměrným rozložením hustoty dřeva po modifikaci. Označení MOR znázorňuje pevnost dřeva ve statickém pohybu, která se pohybuje mezi 65 a 150 MPa.



Obr. 8 Změna modulu pevnosti a pružnosti v čase způsobená působením vysokých teplot (Hill, 2006)

Pokles těchto vlastností je velice zásadní, selhání u termicky modifikovaného dřeva při mechanických zkouškách je pokaždé křehkost. Z tohoto důsledku se termicky upravené dřevo nehodí pro žádný nosný prvek (Sandberg, a další, 2011).

Proto je důležité nastavit správnou teplotu, při které se zachovají oba parametry, jak vysoká pevnost, tak vysoká odolnost (Novák, 2011).

3.1.3 Protipožární vlastnosti termicky upraveného dřeva

Protipožární vlastnosti u termicky modifikovaného dřeva se zdaleka neliší od protipožárních vlastností rostlého dřeva. Výjimkou je dřevo modifikované procesem OHT, kdy se může vyskytnout vysoký obsah oleje ve dřevě a tím se sníží jeho protipožární odolnost (Boonstra, a další, 2007).

4.1 Proces hoření dřeva

Hlavní příčinou hoření dřeva je skutečnost, že dřevo se skládá z organické hmoty, která je složena převážně z uhlíku (50 %), kyslíku (42 %) a vodíku (5 %). Hoření lze tedy popsat jako chemický oxidační děj, při kterém dochází k uvolňování tepla a světelnému sálání, to je zapříčiněno díky vysokému obsahu energie, která se nahromadila během

fotosyntézy a endotermických reakcí. Fotosyntéza vytváří glukózy z oxidu uhličitého a vody a endotermickou reakcí vzniká přeměna glukózy na polysacharidy a lignin. Díky působení termických aktivit se energie může zpětně uvolnit. Pokud nastane zpětné uvolňování energie, dochází ke štěpení hlavních prvků dřeva (celulóza, hemicelulóza a lignin), které tvoří hořlavé plyny. Tyto plyny reagují se vzdušným kyslíkem za dostatečně vysoké teploty a vytvářejí tak oxidy uhlíku, uvolnění vody a velké množství energie, která zajišťuje ohřev a pyrolýzu dřeva. Hořlavé plyny jsou schopné vzplanutí při teplotách přes 220 °C, následuje samovolné hoření dřeva, které již dále nepotřebuje vnější přísun tepla (Reinprecht, 2008; Osvald, a další, 2013).

Proces hoření dělíme do třech fází:

- a) **iniciace:** hořlavá látka v pevném, kapalném nebo plynném stavu, která může způsobit exotermický děj s oxidačním nástrojem (vzplanutí),
- b) **propagace:** následuje šíření plamene a silná termická degradace dřeva, která probíhá s exotermickými reakcemi, tím vzniká tvorba hořlavých plynů s termooxidační reakcí se vzdušným kyslíkem za působení tepelné i světelné energie,
- c) **terminace:** poslední fází je bezplamenné hoření (žhavení) dřeva, které působí až po kompletní utlumení hoření (Reinprecht, 2001).

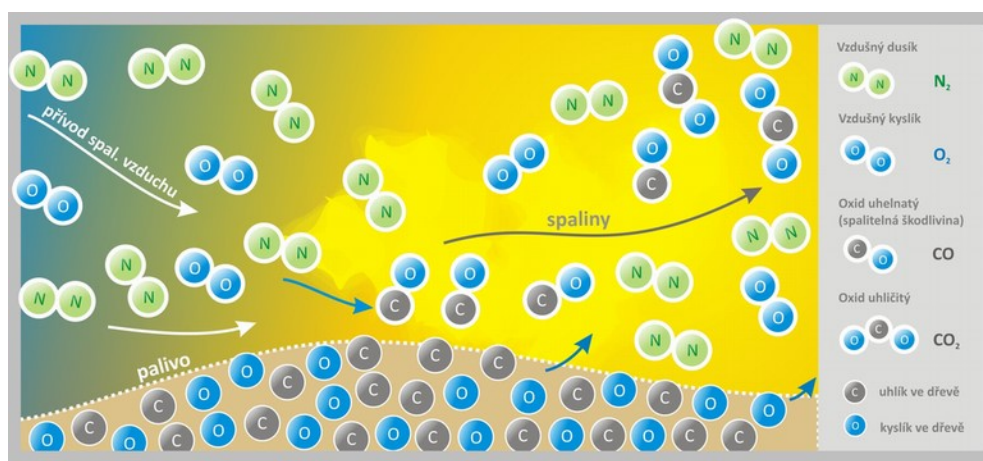


Obr. 9 Trojúhelník hoření (Uhrová, 2013)

4.1.1 Vliv vzdušného kyslíku na proces hoření

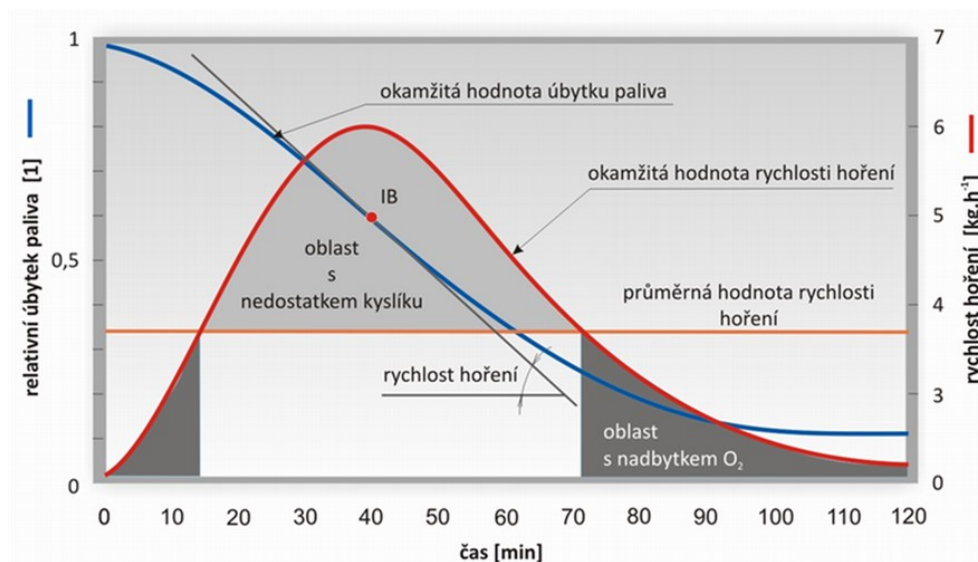
Pokud dojde k nedostatečnému přísunu vzdušného kyslíku ve spalovacím prostoru, dojde k nedokonalému shoření uhlíku na oxid uhličitý a tím vznikne pouze oxid uhelnatý. Oxid uhelnatý pak prostupuje ohništěm a vzápětí se objeví ve spalinách, kde vytváří jejich nežádoucí složku, která je velmi toxická a zároveň se zvětšuje ztráta chemickým nedohořením ve spalinách, v důsledku nedopáleného oxidu uhličitého, který pak nepředá svou využitelnou energii.

Reakce kyslíku se dřevem je jednoduše znázorněna na obrázku 10, kde je z levé strany obrázku přiváděn spalovací vzduch k povrchu tělesa s hlavními složkami dusíku (N) a kyslíku (O₂). Spodní část obrázku zobrazuje povrch dřeva s hlavními prvky uhlíku a kyslíku. A právě kyslík má za následek snadnou zápalnost dřeva oproti jiným materiálům, díky jeho vysokému obsahu ve dřevě. Hlavním cílem při hoření je tedy dosáhnout dokonalého shoření všech uvolněných plynů. Na zmíněném obrázku reaguje vzdušný kyslík a kyslík obsažený ve dřevě s uhlíkem nejdříve na oxid uhelnatý a následně za příznivých podmínek na oxid uhličitý, při tomto procesu záleží zejména na čase, prostoru a správné distribuci spalovacího vzduchu jako oksyličovadla k hořlavým látkám. Tímto dějem se odevzdává teplo do ohniště, vzniká tedy exotermická reakce. Poslední fází na obrázku (Kubesa, a další, 2012).



Obr. 10 Reakce vzdušného kyslíku se dřevem (Kubesa, a další, 2012)

Níže zobrazený obrázek 12 ukazuje děj rychlosti hoření na vzduchový proces v ohništi a jeho produkci škodlivých látek. Proces hoření dřeva v jednom cyklu je vyvozený z křivky dohořívání, zároveň ukazuje vývoj okamžité spotřeby spalovacího vzduchu ve středu ohně. Rychlost hoření a spotřeba spalovacího vzduchu jsou vzájemně spojeny, neboť pro shoření 1 kg dřeva je nutné zajistit přibližně čtyři metry krychlové přístup kyslíku, tedy okolo 5 kg spalovacího vzduchu. Bod IB znázorňuje inflexní bod, tedy křivku vyhořívání a zároveň maximální rychlost hoření. Tato část je také charakterizována jako oblast s největším vznikem škodlivých spalin.



Obr. 11 Průběh rychlosti hoření dřeva při vzduchovém režimu (Kubesa, a další, 2012)

4.1.2 Charakteristika hoření dřeva

Hořlavost dřeva se odvíjí od druhu dřeviny a charakterizuje se podle bodů vzplanutí, hoření a zápalnosti:

- **Bod vzplanutí** se označuje jako nejnižší možná teplota, při níž se vytvoří dostatečně velký objem plynů v důsledku termické degradace dřeva, tím dochází ke smíšení plynů s kyslíkem, který při přiblížení plamene vzplane a následně zhasne. Tento děj probíhá za teplot v rozmezí 180 až 275°C.
- **Bod hoření** se označuje jako nejnižší možná teplota, při které se během zahřívání vytvoří dostatečně velké množství plynů, které zajistí po přiblížení k plamenu jeho vzplanutí a následné nepřerušené hoření. Teplota při bodu hoření se pohybuje v rozmezí 260 až 290 °C.
- **Bod zápalnosti** je označován jako nejnižší možná teplota, která vznikne uvolňováním plynů z termické degradace a za přítomnosti vzduchu, kdy dojde v samovolnému vznícení. Tento proces probíhá za teplot v rozmezí 330 až 520°C (Seigel, 1969).

Tab. 2 Znárodnění času vzplanutí v závislosti na druhu dřeviny a působení teploty
(dashofer.cz, 2009)

Dřevo	Čas vzplanutí dřeva (s) v závislosti na teplotě				
	200 °C	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C
smrk	19,6	5,3	2,1	1,0	0,3
borovice	11,8	6,0	2,3	1,4	0,5
lípa	14,5	6,0	1,6	1,2	0,3
dub	13,3	4,7	1,6	1,2	0,5

Časy se odvíjejí v závislosti na hustotě, vlhkosti a chemickému složení dřeva. Se zvyšující se hustotou a vlhkostí se čas vzplanutí zvětšuje a se zvyšující se přítomností přidaných látek, jako jsou například pryskyřice a tuky se čas snižuje (dashofer.cz, 2009).

4.1.3 Charakteristika plamene

Jedná se o shluk plynů, v němž vzniká proces hoření plynů a par. Plamen můžeme dělit na dva druhy, a to na vnější a vnitřní.

- Vnější neboli homogenní hoření probíhá v plynné fázi, kdy probíhá smíšení všech přítomných plynů, které vytváří plamenné hoření.
- Vnitřní neboli heterogenní hoření probíhá v části nehořlavých plynů, tedy v pevné části na povrchu dřeviny za přítomnosti vzdušného kyslíku, dochází ke žhnutí (Seigel, 1969).

4.1.3.1 Teplota plamene

Teplota ohně se liší v závislosti na zdroji a druhu ohně, se kterým se potýkáme. Obecně se jeho teplota pohybuje v rozmezí okolo 500-5000 °C. Rozprostření teplot v plamenu, jak v jeho objemu, tak výšce, má za důsledek rozložení koncentrace reagujících látek. Protože je teplo vyčerpáno na ohřev a destrukci oxidovadla, teplota plamene nedosahuje maxima ani ve spodní části plamene (Svatoň, 2000).

4.1.3.2 Šíření plamene

Šíření plamene na pevné látky je velmi důležitým jevem při růstu požárů. Ve skutečnosti je u požárů, kde se jedná o velké palivové plochy, zvýšení rychlosti přenosu tepla v čase primárně způsobeno zvětšením oblasti hoření. Plamen se šíří přes pevný materiál, když se část paliva před pyrolýzní částí zahřeje na kritický stav vznícení. Rychlost šíření plamene je řízena tím, jak rychle palivo dosáhne teploty vznícení v reakci na ohřev zepředu plamene a z vnějších zdrojů. Tepelná vodivost materiálu, tepelná kapacita, tloušťka a odrazivost povrchu černého tělesa ovlivňují tepelnou odezvu materiálu a zvýšení hodnot těchto vlastností odpovídá snížení rychlosti šíření plamene. Na druhé straně zvýšení hodnot vlastností plamene, jako jsou uložené povrchové toky a prostorové délky, odpovídá zvýšení rychlosti šíření plamene.

K šíření plamene dochází v různých konfiguracích, které jsou organizovány podle orientace paliva a směru hlavního toku plynů vzhledem k šíření plamene. Přenos tepla z plamene na čerstvé palivo je primárně vodivý v prostorovém rozsahu několika milimetrů a je ovlivňován okolními podmínkami, jako je kyslík, tlak, vztlak a vnější ozáření. U většiny dřevěných materiálů je tento přenos tepla z plamene menší nebo roven povrchové ztrátě sálavého tepla za normálních podmínek prostředí, takže není k dispozici přebytečné teplo pro další zvýšení teploty původního paliva, výsledkem je zabránění šíření plamene (Dietenberger, 1994).

U hoření dřeva rozeznáváme 2 typy měření rychlosti hoření. Tedy hmotnostní rychlost hoření, kterou označujeme jako hmosnost spálené látky za jednotku času na zvolenou plochu ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$) a lineární rychlost hoření je hmotnostní rychlost hoření vztažená k hustotě ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Následující tabulka porovnává rychlost hoření tuhých materiálů.

Tab. 3 Porovnání rychlosti hoření mezi tuhými materiály (Bučko, a další, 1997)

Název	Střední rychlost hoření [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
Dřevo (14% vlhkosti)	50
Přírodní kaučuk	30
Fenoplasty	10
Papír	30

4.1.4 Fáze rozkladu dřeva (termická analýza)

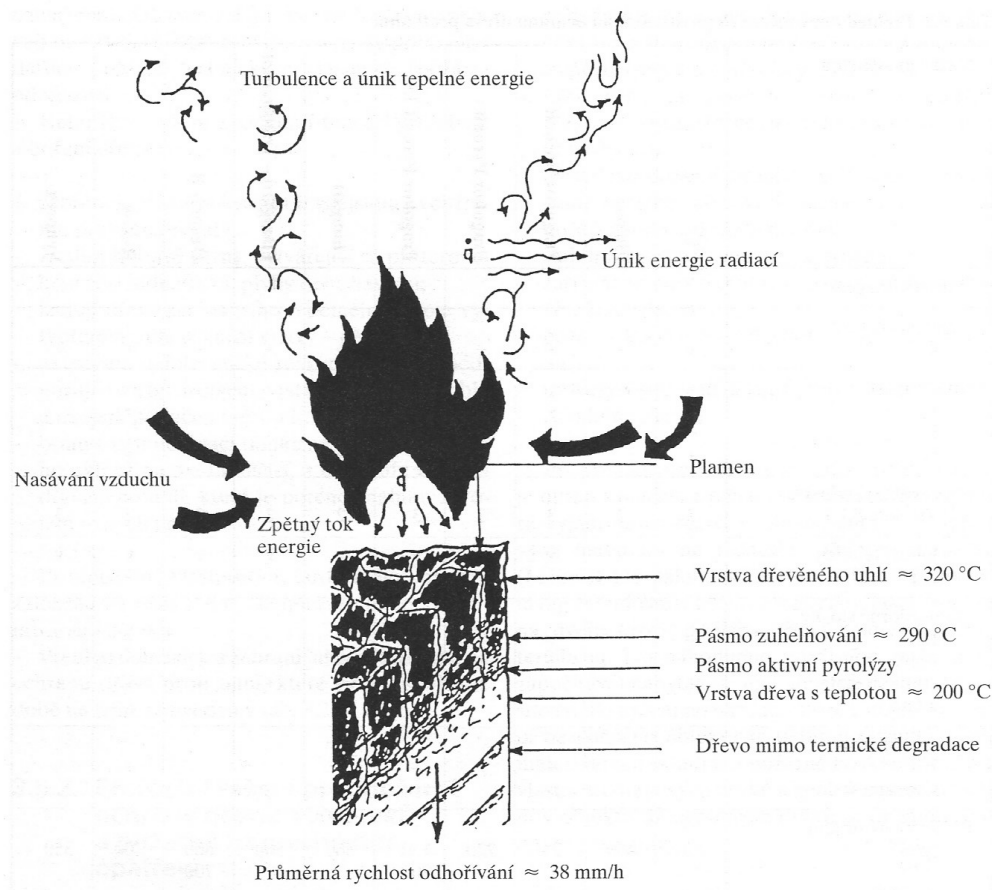
Při dlouhodobém termickém zatížení teplot v rozmezí od 80°C do 120 °C dochází pouze k vysušování dřeva, při kterém se uvolňuje voda volná i vázaná, tím se násobí vnitřní část dřeva, která přichází ke styku s kyslíkem, díky tomu je vysušené dřevo snáze zapalitelné. Při sušení dřeva se na povrchu vyskytují trhliny, začíná se uvolňovat pryskyřice, která následně vytéká (u jehličnatých dřevin) a dochází i ke změně barvy dřeva. Mechanické vlastnosti u takto termicky zatíženého dřeva zůstávají stálé (Kluppel, a další, 2013).

V první fázi termické degradace dřevní hmoty dochází k dehydrataci polysacharidů, tedy celulózy a hemicelulózy. To můžeme sledovat při termickém působení teploty v rozmezí od 150 ° do 200 °C. Ke změnám dochází jak z vizuální stránky, kdy se barva dřeva výrazně zbarví do hnědých odstínů, tak nastává znatelné snížení mechanických vlastností, zejména houževnatosti, která odolává dynamickému namáhání. K uvolňování vznětlivých plynů při této fázi nedochází (Švec, 2016).

Ve druhé fázi termické degradace dřevní hmoty nastává depolymerizace, tedy pyrolýza polysacharidů a ligninu. K tomuto ději dochází při působení teplot nad 220 °C, přičemž nastává vznik plynných složek, mezi které patří například vodík, metan, oxid uhelnatý, aldehydy, ketony a další nízkomolekulární složky. Po rozptýlení těchto prvků nad povrch dřeva dojde k reakci se vzdušným kyslíkem za doprovodu tepla a světelných efektů, nastává děj hoření. V této fázi tedy nehoří dřevo samotné, ale pouze jeho uvolněné plyny. Mechanické vlastnosti dřeva, zejména pevnost, jsou díky pyrolýze značně sníženy (Kandola, a další, 1996).

Následkem pyrolýzy vzniká dřevěné uhlí, které za vysokých teplot přibližně nad 350 °C za přísunu vzdušného kyslíku samovolně bezplamenně hoří, tedy žhne. Nastává další uvolňování termické energie, která je potřebná pro další termickou degradaci (pyrolýzu) vnitřních částí dřeva (Bartlett, a další, 2018).

Po všech těchto zmíněných dějích se konečným prvkem dřeva po hoření stává anorganický zbytek, tedy popel (Švec, 2016).



Obr. 12 Schéma hoření dřeva (Švec, 2016)

Stupeň hořlavosti dřeva se neodvíjí pouze na základě jeho chemického složení, ale i na mnoha následujících faktorech:

- druh dřeviny, tedy jeho vnitřní skladba v závislosti na množství hustoty, pórovitosti, složení anatomické skladby a další,
- rozměrech zasaženého dílce, tedy jeho velikost, podíl plochy k celkovému objemu, praskliny, velikost čelních a postranních částí apod.,
- působení okolního ovzduší, zejména okolní teplota a relativní vlhkost vzduchu, složení atmosféry (poměr kyslíku, oxidu uhličitého, rychlost proudění apod.)
- možný výskyt podpůrných látek jakou jsou lepidla, nátěrové hmoty, retardéry hoření a další (Švec, 2016).

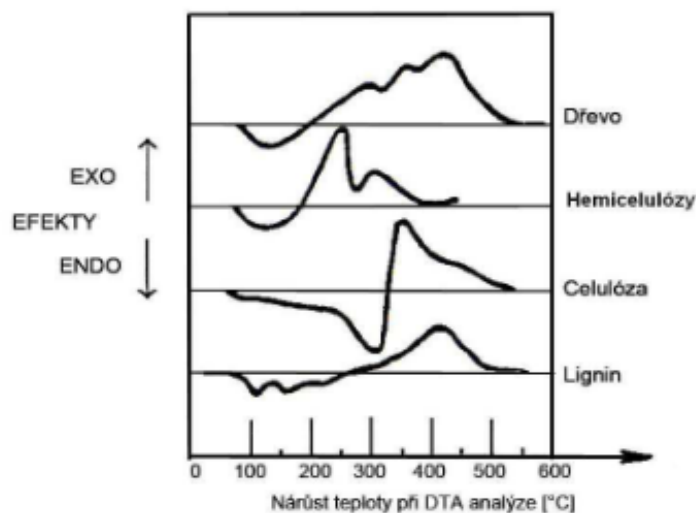
4.1.5 Termická degradace polysacharidů a ligninu

Termický účinek vzniká za zvýšených teplot dřevní hmoty, který má za následek chemickou reakci. Reakce jsou typu hemolytického i heterolytického, při kterých vznikají meziprodukty a produkty.

Děj termického rozkladu je ovlivněn zejména:

- intenzitou dováděné teploty,
- příměsemi anorganických látek (minerály, aditiva-biocidy, tvrdidla, retardéry hoření aj.),
- množstvím přiváděného kyslíku (Mettler, a další, 2012).

Zmíněné reakce se realizují v rozhraní teplot od 66 °C do 110 °C. Bude-li teplota nižší, reakce se neuskuteční. Zlomová teplota nastává při 150 °C a více, kdy dochází k zřetelnější deformaci stavebních složek dřeva. Prvotní porušení nastává u hemicelulózy, dále celulózy a nakonec ligninu (Osvald, a další, 2013).



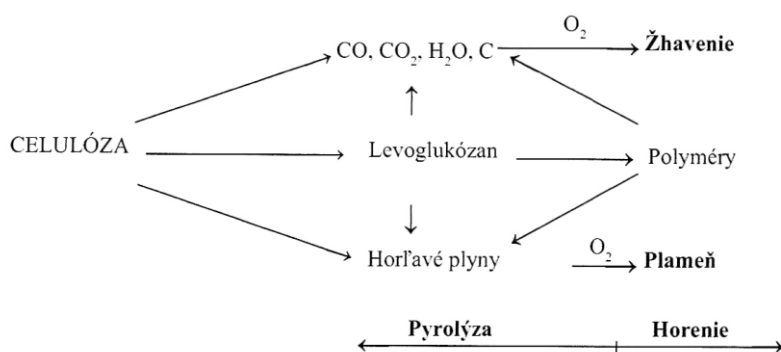
Obr. 13 Přehled energetických efektů při termickém rozkladu dřeva a jeho složek (entotermická reakce - ENDO, exotermická reakce - EXO) (Reinprecht, 2008)

4.1.5.1 Termická degradace hemicelulózy

Termolýza hemicelulózy je značně intenzivnější již při poměrně nízkých teplotách. Její degradace začíná již při teplotách pod 200 °C a zároveň dochází i k výraznějším exotermickým účinkům (Zhou, a další, 2017).

4.1.5.2 Termická degradace celulózy

Termický rozklad celulózy je na rozdíl od hemicelulózy stabilnější, a to až do teplot 250 °C, kdy u ní nedochází k významným změnám. K významné depolymerizaci dochází při teplotách nad 300 °C, při tvorbě levoglukózanu, který se následně přetvoří na hořlavé plyny. Obrázek 14 znázorňuje průběh termické degradace celulózy a proces jejího hoření (Mettler, a další, 2012).



Obr. 14 Zobrazení principu termického rozkladu a hoření celulózy (Reinprecht, 2008)

4.1.5.3 Termická degradace ligninu

Lignin je nejstabilnější stavební složkou dřeva. Termický rozklad ligninu je doprovázen komplikovaným procesem, při kterém probíhá štěpení a kondenzační reakce. V první fázi dochází při teplotách 100 až 180 °C k jeho plastifikaci, tento děj nazýváme endotermickou fází. K jeho exotermickému rozkladu dochází až při teplotách 300 až 400 °C, respektive i větších (Kawamoto, 2017).

Tabulka 4 znázorňuje možné fáze hoření za určitých teplot a jejich proces.

Tab. 4 Zobrazení fází hoření dřeva za určitých teplot (Reinprecht, 2001)

Teplota	Fáze hoření	Komentář	Druh rozkladu	Produkt termického rozkladu	Změna vlastností
900 °C					
800 °C	Hoření plynných produktů rozkladu (již od samo – vznícení - 300 °C)				
700 °C				Tvorba popela	
600 °C				Dohasínání uhlí	
500 °C					
400 °C			Rozklad krystalické celulózy	Konec uhelnění	
300 °C	Samovznícení plynů	Zapálení a hoření bez vnějšího zdroje	Rozklad vláknité struktury	Tvorba dýmu z dehtových kapek	Nevratné ztráty pevnosti
200 °C	Bod vzplanutí	Krátké vzplanutí při vnějším zdroji	Měknutí ligninu, rozklad celulózy a hemicelulózy	Začátek uhelnatění Začátek tvorby plynů	
100 °C			Reakce s O ₂ , tvorba trhlin, zvětšení povrchu		
0 °C	Sušení	Horní hranice tepelné únosnosti		Plynné látky (především pára)	Zvyšování pevnosti vlivem poklesu vlhkosti

5.1 Ochrana dřeva proti hoření

V této kapitole budeme řešit problematiku spojenou s ochranou dřeva vůči působení zvýšených teplot. Uvedeme si stručný přehled druhů ochrany dřeva a jeho aplikaci. Na trhu se vyskytuje spousta chemických látek, které jsou schopny oddálit vznětlivost dřeva, snížit jeho hořlavost a zpomalovat šíření ohně. Je však nutné si uvědomit, že za použití těchto látek nám nevznikne nehořlavý materiál a ani nebude odolávat dlouhodobému tepelnému namáhání. Při požáru, kde je dřevo ošetřené retardéry hoření je schopné odolat přibližně 15 minut, tedy dokážou degradaci pouze zpomalit nikoliv zamezit. Ovšem i když je dřevo hořlavým materiálem, při správném dimenzování jsou schopny dřevěné konstrukce odolat více než nehořlavý železný materiál, dřevo je totiž schopné si na dlouhou dobu zachovat své mechanické vlastnosti, oproti železným materiálům, který zcela ztrácí při dlouhodobém působení vysokých teplot přesahujících 400-450 °C svou pevnost (Rowell, 2013).

5.1.1 Druhy protipožární úpravy dřeva

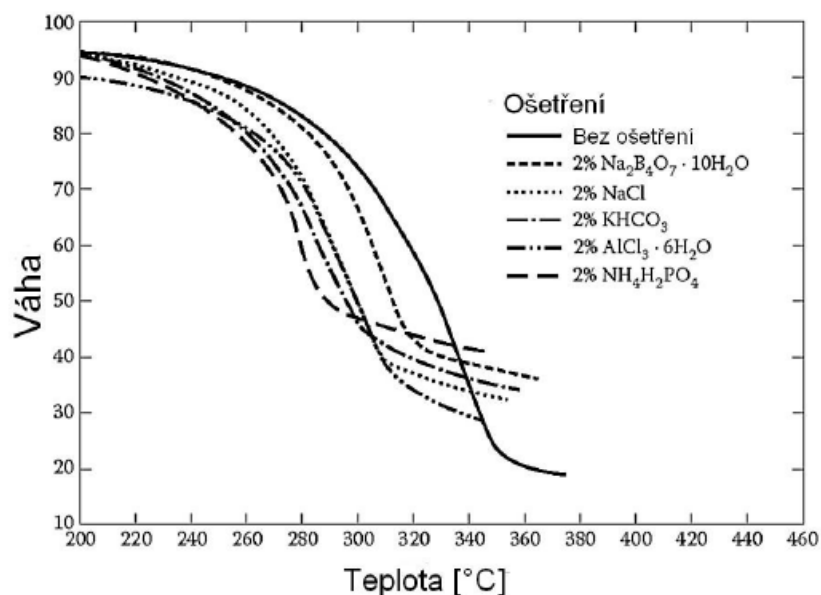
Protipožární úprava dřeva obecně zlepšuje požární vlastnosti snížením množství hořlavých těkavých látek uvolňovaných během vystavení ohni nebo snížením účinného spalovacího tepla, tyto děje mohou probíhat zároveň. Oba výsledky mají za následek snížení uvolňování tepla, zejména během počátečních fází požáru, a tedy následné snížení rychlosti šíření plamene po povrchu (Ross, 2010).

Existují tři hlavní způsoby aplikace retardérů hoření na dřevo a výrobky z něj:

- Ochranným inertním obalem, který je tepelně izolační a chrání tak dřevo před zvyšujícími se teplotami, tím dochází k oddálení vzniku hořlavých plynů. Používá se například zasypáním pískem, štěrkem či popelem nebo omítnutí vápnem, obložením a obalením minerální plstí (sklená vata). Nejnovějším způsobem úpravy je zpenitelná nátěrová hmota, která při působení zvýšené teploty vytváří na povrchu zasaženého dílce vrstvu nehořlavé izolující pěny. Jedná se o poměrně nejjednodušší a neúčinnější použití retardérů hoření, kterou však doprovází i záporné vlastnosti, a to například z konstrukčního nebo vizuálního hlediska. V dalším případě, kdy se převážně jedná o relativně silnou vrstvu, vznikají problémy s jejím odpadáváním a dochází k poškození mechanických vlastností a stárnutí materiálu, takto ošetřeného.
- Naředěním hořlavých plynů, v takovém poměru, dokud se stanou nezápalnými a zároveň zamezí přístupu vzduchu ke dřevu při požáru. Těchto efektů lze docílit v podobě chemických látek pomocí impregnace nebo nátěry, kdy při zvýšené teplotě začíná jejich chemický rozklad na jednodušší, převážně plynné, sloučeniny, které jsou nehořlavé a na povrchu se mísí s pyrolýzními plyny natolik, že zamezí vzniku zápalné a hořlavé směsi. Mezi dobou rozkladu ochranné látky spotřebovávají teplo na svou destrukci a tím zamezuje ohřátí dřeva na jeho destruktivní teplotu. Nejčastěji se používají amonné soli (fosforečnany, síran nebo halogenidy) a sloučeniny, které obsahují krystalickou vodu (borax, chlorid vápenatý, soda, aj.) (Östman, 2017)
- Podpořením tvorby zuhelnatělé izolační vrstvy a zároveň zamezení žhnutí vzniklého dřevěného uhlí. Při hoření dřeva na jeho povrchu vzniká zuhelnatělá

vrstva, která má relativně silnou tepelně izolační vlastnost. Právě tato vrstva zpomaluje proces hoření, a tak u některých požárů můžeme spatřit zachované konstrukce střešních krovů, u mohutnějších konstrukcí může dokonce nastat i samovolné přerušení hoření. Zrychlení tvorby zuhelnatělé vrstvy lze docílit za pomoci retardérů hoření, které značně zrychlí hydrolyzy glykosidických vazeb, zároveň zesiluje ochrannou vrstvu a zmenšuje počáteční teplotu tepelné degradace. Jde zejména o chemické látky amonných sloučenin (fosforečnany, sírany nebo halogenidy) a kyseliny borité. Zmíněné látky zabraňují žhnutí zuhelnatělé části dřeva (Švec, 2016).

Na obrázku 15 je znázorněn rozdíl mezi dřevem neupraveným a dřevem ošetřeným anorganickými retardéry při působení vysokých teplot.



Obr. 15 Porovnání mezi dřevem neupraveným a dřevem ošetřeným anorganickými retardéry (Tang, a další, 1968).

5.1.2 Retardanty hoření

Antipyrény jsou označovány jako retardanty hoření, slouží k prodloužení odolnosti dřeva, ale i jiných hořlavých materiálů, vůči působení ohně. Tyto látky se vyskytují v kapalném stavu i ve stavu pevném, který je rozpustný ve vodě, tedy vzniká roztok. Retardéry jsou schopné ovlivnit přenosové a reakční děje v daném materiálu, což má za následek oddálení tepelné degradace a vznícení, obvykle má nejlepší účinky

v počáteční fázi požáru. V plně rozvinutém ohni však takové ošetření obvykle nemá žádné nebo jen omezené účinky. Toto ošetření většinou neovlivní důležité faktory požární odolnosti dřevěných konstrukcí, jako je rychlost zuhelnatění (Wei, a další, 2019).

Jak jsme si již zmínili, zpomalovače hoření dřeva mohou ovlivnit vlastnosti reakce na oheň, ale u plně rozvinutého ohně je vliv malý, nelze zcela zamezit, ale pouze oddálit a zmenšit jeho termický rozpad v případě, že se aplikoval správný retardér s vhodnou aplikací. Jedinou výjimkou jsou intumescentní (pěnové) laky, které mohou prodloužit dobu pro zahájení zuhelnatění a tím zvýšit požární odolnost dřevěných konstrukcí. Zpomalovače hoření v žádném případě nemohou způsobit, že je dřevo nehořlavé (Östman, 2017).

Nevýhodou je, že se kladné protipožární vlastnosti původních produktů zpomalujících hoření mohou u dřeva časem zhoršovat, zejména při venkovních aplikacích. Při vystavení vysoké vlhkosti tedy mohou chemikálie retardantu migrovat ve dřevě směrem k povrchu, a nakonec mohou být vyluhovány. To znamená, že může dojít ke zhoršení požáru, protože chemikálie migrují od povrchu směrem k oblastem s nižší koncentrací hlouběji uvnitř materiálu, což zvyšuje hořlavost produktu (Östman, 2017).

5.1.2.1 Druhy retardantů hoření

Nejběžnější prostředky v podobě antipyrénů se používají ve formě kapalných roztoků, které obsahují převážně prvky chloru, bromu, hliníku, boru, dusíku, fosforu či křemíku. Dále se můžeme setkat se spousty přípravků, které přispívají k jejich lepší účinnosti. Prvky jako jsou například zinek či molybden mají schopnost potlačení vzniklého kouře a jsou přidávány do sloučeniny zpomalovače hoření. Dále můžeme použít oxid antimonitý nebo borát zinku k halogenovaným retardantům hoření, kde vzájemně vytvoří účinnou synergii. Použití halogenů je však v Evropské unii zakázáno a to z důvodů, že jsou karcinogenní a teratogení (Zhang, a další, 2006).

Retardanty je možné rozdělit do následujících skupin dle chemického složení:

- halogenové,
- anorganické,
- retardanty na bázi fosforu a dusíku.

5.1.2.1.1 Halogenové retardanty

Mezi běžné retardanty hoření patří halogenové parafíny, alifatické a aromatické sloučeniny a halogenové polymery. Všeobecně je známo, že u látek bromovaná aromatická – chlorovaná alifatická – bromované alifatické se tepelná stabilita snižuje. U chlorovaných aromatických látek je převážně stabilní, proto nejsou příliš vhodné pro sloučeniny zpomalující hoření.

Jejich účinnost spočívá tehdy, kdy volné radikály vodíku a hydroxyly reagují se vzdušným kyslíkem. U bromovaných retardantů hoření dochází k uvolňování aktivních atomů bromu do plynné fáze dříve, než těleso dovrší zápalné teploty. V procesu hoření dochází k uvolňování vodíku ze zasaženého tělesa, který se následně váže s bromovým radikálem při vzniku bromovodíku. Tento děj má za důsledek snížení vzniku těkavých látek díky spékání polymeru, tedy zpomalení jeho hoření.

5.1.2.1.2 Anorganické retardanty

Zde se nachází velká řada anorganických látek, které přispívají k procesu zpomalení hoření nebo působí synergii s ostatními retardanty hoření. Můžeme se například zařadit látky na bázi fosforu, dusíku či bromu.

Hydroxidy kovů alkalických zemin

Jde o typ retardantu hoření, který si zakládá na termickém rozkladu hydroxylových kovů alkalických zemin. Mezi nejčastější se řadí hydroxid hlinitý a hořečnatý (Rothon, 2003). Při jejich procesu hoření nastává uvolňování interních plynů, tedy vodní páry, která promísí směs paliva a kyslíku, čímž se zabrání exotermní radikální reakci, která vzniká ve spalovací zóně, zároveň dochází k absorpci energie v důsledku endotermického rozkladu, tedy ochlazení a zpomalení procesu pyrolýzy, vzniku ochranné nehořlavé vrstvy na povrchu tělesa (popel), která zamezuje uvolňování hořlavých plynů z polymeru a jeho přenosu tepla (Khalturinskii, 1900). Výhodou těchto látek je jejich poměrně nízká pořizovací cena, netoxičnost a jednoduchá aplikace. Nevýhodou však je jejich relativně nízká účinnost, která má za následek větší spotřebu, a to až v 60 % koncentraci nebo použití s jinými druhy látek zpomalující hoření (Khattab, 2000).

5.1.2.1.3 Retardanty na bázi fosforu

Jedná se o skupinu retardantů hoření na bázi fosforu, která zahrnuje anorganické, organické a halogenové fosfáty. Tyto retardanty mohou působit jak ve fázi plynné, tak i v pevné (Maiti, a další, 1993). Halogenové retardanty se vyskytují zejména v plynné fázi, kde dochází k odchyťování volných radikálů, tedy potlačují exotermní děj. Nehalogenové retardanty působí zejména v pevné fázi, ty iniciují tvorbu popela v důsledku polymeru kyseliny fosforečné (Schmitt, 2007).

Z hlediska životního prostředí se retardanty s fosfáty ukazují jako potenciální hrozba. To je způsobeno jak kyselou erozí, eutofizací, tak i možnou karcinogenitou (Petrová, a další, 2015).

5.1.2.1.4 Retardanty na bázi dusíku

Retardanty dusíku jsou vhodné pro zpomalovače hoření díky své všestrannosti. Mezi jejich největší výhody řadíme účinnost při nízké koncentraci, dále že při hoření nevytváří dioxany a furany, jedná se o nekorozivní látky, vykazují kladnou UV stabilitu, recyklovatelné látky vzhledem k jejich vysoké termické stabilitě a některé tyto sloučeniny dusíku vykazují velmi dobré synergické děje s klasickými antipyrény hoření. Tyto retardéry mají však i své nevýhody, jako je například jejich vázání na specifické polymery. Nejvíce užívanými retardéry na této bázi je polyfosforečnan amonný, soli melaminu nebo aloxyaminy.

Nejhlavnějšími retardéry na bázi dusíku jsou sloučeniny, které obsahují melamin a jeho deriváty. Při působení vysoké teploty se tyto sloučeniny endotermicky rozkládají, a dochází k uvolňování amoniaku, který mísí vzdušný kyslík s hořlavými plyny. Mezi nejpoužívanější retardéry v oboru stavebnictví na této bázi se řadí nátěry intumescentní neboli zpěňující. Ty pracují při tepelném rozkladu melaminového polyfosfátu, který vede ke vzniku polyfosforečnanu amonného a uvolnění melaminu (Laoutid, a další, 2009). Jedná se o intenzivní chemickou reakci, která má za následek vypěnění ošetřeného prvku a zároveň zajištění vzniku ochranné části (Wang, a další, 2012). Ochranná funkce vzniká za vysokých teplot, kdy nátěr pohotově expanduje a karbonizuje při teplotách 180-200°C. Tím se vytvoří teplotně izolační stabilní pěnová vrstva, která zabraňuje přístupu okolního kyslíku k povrchu ošetřeného prvku, tím dochází k oddálení jeho hoření, šíření ohně a vzniku kouře. Vytvořená pěnová vrstva dokáže chránit povrch jen po určitou dobu. Nátěr

během své expanze znásobuje svůj objem až padesátkrát, výsledná tloušťka nátěru se pohybuje v řádech centimetrů z počáteční tloušťky nátěru 0,3 až 1 mm v závislosti na chtěnou požární odolnost (Heidingsfeld, 1999).

Z hlediska na jeho složení vůči zdravotní nezávadnosti vyplývá, že vysoké dávky melaminu mohou mít nežádoucí účinky pro lidské zdraví. Následky mohou být močové kameny, krystalurii a akutní selhání ledvin. Látka melaminu doposud nebyla klasifikována jako karcinogenní pro člověka s ohledem na neprůkazné důkazy (Hau, a další, 2009).

5.1.2.2 Aplikace retardantů

Látky v podobě antipyrénů aplikujeme na prvek pomocí metod nátěrem, nánosem, máčením, ponorem, stříkáním či vysokotlakou impregnací. Účelem aplikace je nanesení stejnosměrné vrstvy nátěru v několika vrstvách.

U aplikace máčením a ponorem je celý materiál ponořen do roztoku antipyrénu. Tento druh aplikace má však mnoho nedostatků, mezi které patří dostatečné množství kapaliny pro celý ponor vzorku, tedy je za potřebí větší množství ochranné látky a zároveň může dojít k nerovnoměrnému nasycení povrchů. Tento způsob aplikace nezaručuje přesné množství nanášené látky a její přesnou koncentraci. Rozdíl mezi těmito dvěma aplikacemi je převážně v čase. Máčení se pohybuje okolo 15 minut a ponor trvá jen po několik pár minut. Po aplikaci se vzorky musí nechat okapat a následně vysušit. Sušení trvá delší dobu, což má za následky zvýšení nákladů (Horský, 1987).

U aplikace stříkáním probíhá proces za stálého míchání v nádobě s tryskou. Tato metoda uskutečňuje přesné nanesení ochranné látky a zajistit tak její rovnoměrné nanesení po celém povrchu vzorku. Další výhodou této metody je její menší spotřeba, rychlejší aplikace a zkrácená doba sušení. Celkově tato metoda vychází lépe oproti máčení, a to jak po stránce snížení nákladů, tak z pohledu časové náročnosti (Reinprecht, 2008).

Poslední metodou nanášení je vysokotlaká impregnace, která se aplikuje ve speciální tlakové komoře, kde se napouští dřevo impregnační látkou, ta zajistí, že se nátěr dostane dostatečně hluboko pod povrch dřeva. To zajistí dřevu dostatečnou odolnost vůči působení přímému kontaktu se zemí či vodou.

5.1.2.3 Vliv na životní prostředí

Čím dál tím více se zajímáme o životní prostředí, díky tomu v posledních letech vznikl výzkum, který se zabývá životním cyklem již aplikovaných chemických látek. Látky, které se používají na oddálení hořlavosti jsou na základě tohoto zkoumání přehodnocovány. Ovšem použití těchto látek má velký vliv na protipožární ochranu, proto se musí hodnotit jak jejich klady, tak i zápory. Často používané halogenové antipyrény mají sice velmi dobrou účinnost a všestrannost použití při ochraně proti požáru, avšak jejich bioakumulace a možná toxicita zapříčinila navýšení regulace a omezení jejich produkce a využití. Po halogenových retardantech přicházejí nové alternativy nehalogenovaných antipyrénech. Složky anorganických látek, mezi které patří hydroxid hlinitý a hořečnatý zastávají funkci alternativy, která je šetrnější k životnímu prostředí. Ovšem použití těchto látek je redukováno, v důsledku potřebného nahromadění anorganických látek až na 70 %, aby došlo k jeho samozhašení. V současnosti se preferuje spojení dusíkatých látek, které zpomalují proces hoření a sloučeniny fosforu, další možností je použití nanomateriálů (Petrová, a další, 2015).

6 Metodika

Pro testování protipožární odolnosti existují Evropské normy, které jsou velice náročné a striktní na provedení, to však zajišťuje jejich značně přesné měření. Nicméně zmíněná náročnost této normy nás nutila přejít na jednodušší a lépe proveditelnou metodu, tedy na testování podle české normy ČSN 73 0862/B-2 (1991), která stanovuje stupně hořlavosti stavebních hmot. Tato norma se využívala před zavedením evropských norem.

Na základě postupu měření, lze metodiku rozdělit do následujících bodů:

- příprava zkušebních vzorků,
- označení zkušebních těles,
- přeměření a vážení vzorků,
- úprava termickou modifikací těles,
- chemická analýza vzorků,
- aplikace retardéru hoření,
- testování požární odolnosti,
- vyhodnocení naměřených dat,
- diskuze.

7 Experimentální část

Jak jsme již zmínili v předešlé kapitole 7 na měření protipožární odolnosti byla zvolena metodika dle normy ČSN 73 0862/B-2, která byla v našem případě modifikována.

Toto testování napodobuje proces hoření dřeva za neustálého přísunu kyslíku a volného přístupu spalin.

Hlavním zjišťovaným parametrem byla změna hmotnosti vzorku po testování a dalšími zjišťovanými parametry byly rychlost hoření, maximální rychlost hoření, ale i doba dosažení maximální rychlosti.

7.1 Příprava zkušebních těles

Pro testování protipožární odolnosti jsme si připravili vzorky o rozměrech 100 x 100 x 20 mm z exotické dřeviny mahagon (*Swietenia mahagoni*), která se vyznačuje svou intenzivní červenohnědou barvou s pruhy na radiální straně s viditelnými póry a s vysokým podílem tříslovin, což zajišťuje jeho výjimečnou odolnost a tvarovou stálost.

Počáteční úpravou těles bylo sušení vzorků, které probíhalo v sušárně ULM 400 za stálé teploty 103 °C, díky tomu došlo k ustálení na 12 % vlhkost vzorků, čímž se dosáhlo stejných vstupních podmínek.

Počet zkušebních těles byl stanoven na 40 vzorků, které se rozdělily na dva soubory, tedy 20 vzorků bylo ošetřeno přírodním retardantem a zbylých 20 bez jeho ošetření. Oba tyto soubory byly rozděleny na 4 podskupiny, dle jejich teploty termické úpravy (160 °C, 180 °C, 210 °C) a bez termické úpravy 20 °C.

7.2 Označení zkušebních těles

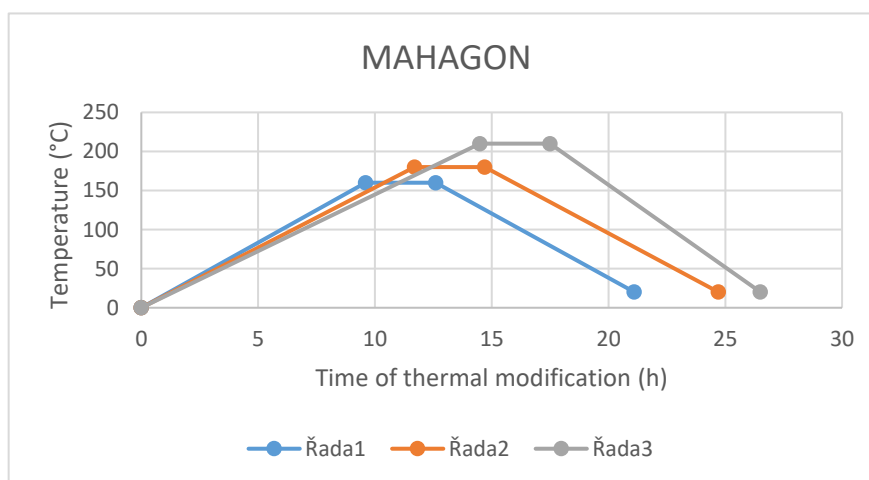
Označení vzorků jsme prováděli po rozdělení na zmíněné soubory, pomocí psací tužky. Zvolený systém popisu byl dřevina/ stupeň teploty modifikace/typ antipyrénu či bez něj/ číslo vzorku, tedy např. MA/160/A/1. Dodatečné značení těles mohlo nastat po aplikaci retardéru hoření, kdy mohl být popis hůře viditelný.

7.3 Přeměření a vážení vzorků

Vzorky se před termickou modifikací přeměřili pomocí ručního laboratorního měřidla a následovalo jejich první vážení, které probíhalo na laboratorní váze MS 1602S s přesností $\pm 0,01$ g. Tento proces přeměření a vážení vzorků se opakoval po skončení testování požární odolnosti. Všechny zjištěné hodnoty se zapisovaly do excelových souborů, které dále sloužily i pro výpočet hustoty vzorků.

7.4 Úprava termickou modifikací těles

Vzorky z prvního souboru 20 vzorků mahagonového dřeva byly modifikovány dle metody ThermoWood, při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C. Proces této úpravy lze postupně popsat jako ohřívání, tepelná modifikace a chlazení, to vše je zobrazeno v následujícím grafu. Detailnější proces výroby ThermoWoodu® je vysvětlen v kapitole 3.1.1.



Obr. 16 Graf znázorňující závislost termické modifikace na čase

Zdroj: Vlastní

7.5 Chemická analýza vzorků

Zjištění analýzy z chemického pohledu bylo zjištěno z následného zpracování vzorků na podobu pilin o rozměrech částic 0,5-1 mm, které byly následně vytaveny Soxhletově extrakcí při působení směsi toluenu a ethanolu dle ASTM D1107-96. Poměr

ligninu byl zjištěn za pomoci metody ASTM D1106-96, obsah holocelulózy pomocí metody autorů (Wise, a další, 1946) a obsah celulózy se stanovil Seifertovou metodou. Hemicelulóza se stanovila jako rozdíl mezi holocelulózou a celulózou. Všechna tato měření byla prováděna 4-krát na jeden vzorek.

7.6 Aplikace přírodního retardantu

Jako protipožární ochranu jsme použili přírodní antipyrén arabinogalaktan o koncentraci roztoku 50 % z důvodu předběžných experimentálních výsledků. Retardér jsme tedy smíchali s vodou a následně aplikovali nanesením štětce ve dvou vrstvách.

Tato ochranná látka se skládá z hemicelulóz, které jsou obsazeny v primárních a sekundárních buněčných stěnách rostlinných buněk. Arabinogalaktan je rozpustný ve vodě při pokojové teplotě a je možné ho získávat z modřínového dřeva, který ho obsahuje v množství okolo 10 až 20 % (Gaff, a další, 2019).



Obr. 17 Aplikace přírodního retardéru hoření na dřevinu mahagon

Zdroj: Vlastní

7.7 Testování požární odolnosti

Testování probíhalo na stroji kónické kalorimetrie, který je nejpoužívanější malorozměrovou zkouškou pro rychlost uvolňovaného tepla vzorku vystaveného v horizontální rovině regulovaným úrovnovým ozářením externím zapalovačem.

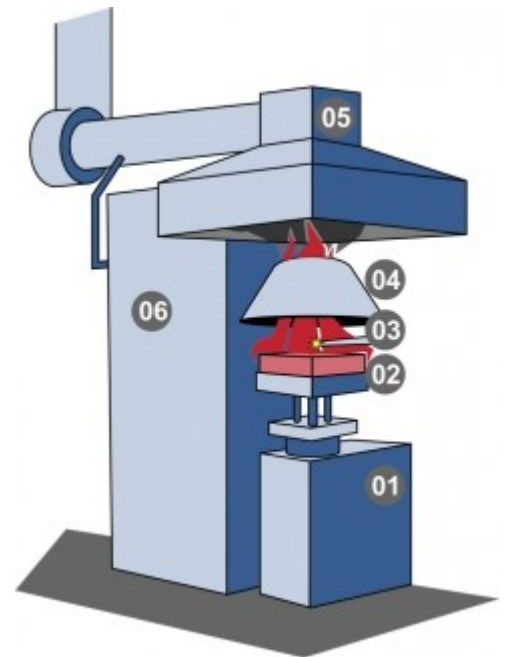
Rychlost uvolňování tepla je určena měřením spotřeby kyslíku odvozené z koncentrace kyslíku a rychlosti toku v proudu produktu spalování. Tento stroj dále získává informace o hmotnostním úbytku zkušebního tělesa, dobu zapálení zkušebního vzorku při působení tepelného toku, děj oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého a zároveň účinnost výhřevnosti dřevěného materiálu.

Kónický kalorimetr je doprovázen normou ISO 5660-1:2002, která stanovuje maximální rozměry testovacích těles a to 100 x 100 x 50 mm (ISO 5660-1., 2012).

7.7.1 Skladba kónického kalorimetru

Schéma kónického kalorimetru si popíšeme na následujícím obrázku číslo 16. na kterém jsou zmíněny jeho základní součásti.

- váha na zjištění poklesu hmotnosti (1),
- upevňovací konstrukce na daný vzorek (2),
- piezoelektrické zdroje jiskry (3),
- topné spirály (4),
- obvodové potrubí s měřiči samostatných veličin (laserový fotometr, proudová rychlostní sonda, měřič koncentrace kyslíku, oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého) (5),
- měřící panel (6).



Obr. 18 Schéma kónického kalorimetru (Najmanová, a další, 2015)

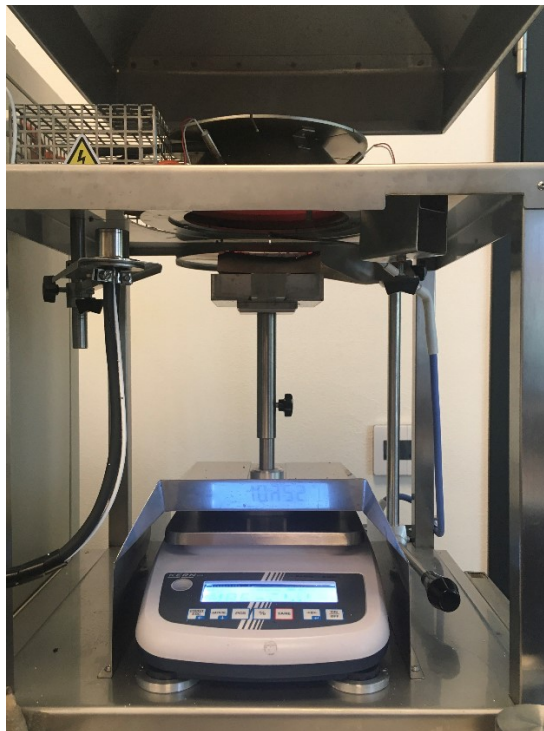
7.7.2 Kalibrace kónického kalorimetru

Kalibrace je zapotřebí provést při každém novém testovacím dni a provádí se v několika následujících krocích, které se uskutečňují v daném pořadí před samotnou zkouškou. Celková příprava kalibrace zabere přibližně 15 minut (ISO 5660-1., 2012).

-
- a) Zajištění přívodu vody.
 - b) Vizuelní kontrola filtrů a vysoušedla.
 - c) Zajištění průtoku vody.
 - d) Kalibrace vyhodnocení plynů.
 - e) Výpočet kalibrační konstanty C .
 - f) Zajištění umístění vzorku.
 - g) Nastavení tepelného toku zářiče.

Výše zmíněný postup je uveden v hlavních krocích bez popisu. Přesný a rozsáhlý postup uvádí již zmíněná norma ISO 5660-1:2002.

Doba testování jednoho vzorku nám zabrala 30 minut za působení stálého plamene. Během této doby se průběžně zaznamenávala data do systému, který byl propojen s kónickým kalorimetrem.



Obr. 19 Měření požární odolnosti na kónickém kalorimetru

Zdroj: Vlastní

7.8 Vyhodnocení naměřených dat

Naměřená data se zapisovala do tabulkových excelových souborů, které nám následně poskytovala důležitá měřená data, ty jsme převáděli do níže zmíněného programu.

Pro zjištění působícího vlivu na jednotlivé faktory protipožární bezpečnosti se provedla analýza rozptylu ANOVA a Fisherův F-test za pomoci softwaru Statistika 13 EN. K porovnání požárních vlastností a chemického složení dřeva se učinila analýza rozptylu ANOVA a Spearmanova korelace.

Pro statické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita vícefaktorová analýza, opět v softwaru Statistika. Tato analýza rozptylu hodnotí efekty jednotlivých faktorů a jejich vzájemnou kombinaci. K určení vzájemné kombinace faktorů a jejich efektu byl použit zmíněný Fisherův F-test s danou hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Danou hladinu významnosti nám stanovuje hodnota P, která hodnotí testovaný faktor dle zmíněných hodnot:

- $P = 0$ faktor působí,
- $P = 0,05$ vliv faktoru je na hranici statistické významnosti,
- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statistický významný,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný.

8 Výsledky

V tabulce čílo 5 jsou zobrazené hodnoty hustoty dřeva před termickou modifikací a po termické modifikaci.

Tab. 5 Průměrné hodnoty hustoty před termickou modifikací a po termické modifikaci

Teplota modifikace vzorků (°C)				
	20 °C	160 °C	180 °C	210 °C
Hustota před modifikací (kg/m^3)	503,29	508,93	508,16	507,44
Hustota po modifikací (kg/m^3)	503,29	563,31	508,16	499,15

Zdroj: Vlastní

8.1 Úbytek hmotnosti vlivem hoření

Tabulka číslo 6 zobrazuje průměrné hodnoty společně s variačním koeficientem pro úbytek hmotnosti vlivem hoření u termicky modifikovaného dřeva ošetřeného přírodním antipyrénem či bez jeho použití.

Tab. 6 Průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro úbytek hmotnosti vlivem hoření

Použití retardéru	Teplota termické modifikace (°C)	Úbytek hmotnosti vlivem hoření	Variační koeficient (%)
Bez aplikace retardéru	20	10178,6	3,0
	160	11846,0	18,6
	180	11492,8	18,1
	210	12871,4	35,7
Aplikace přírodního retardéru	20	9134,7	2,7
	160	10503,2	20,1
	180	10432,7	18,0
	210	11558,8	35,2

Zdroj: Vlastní

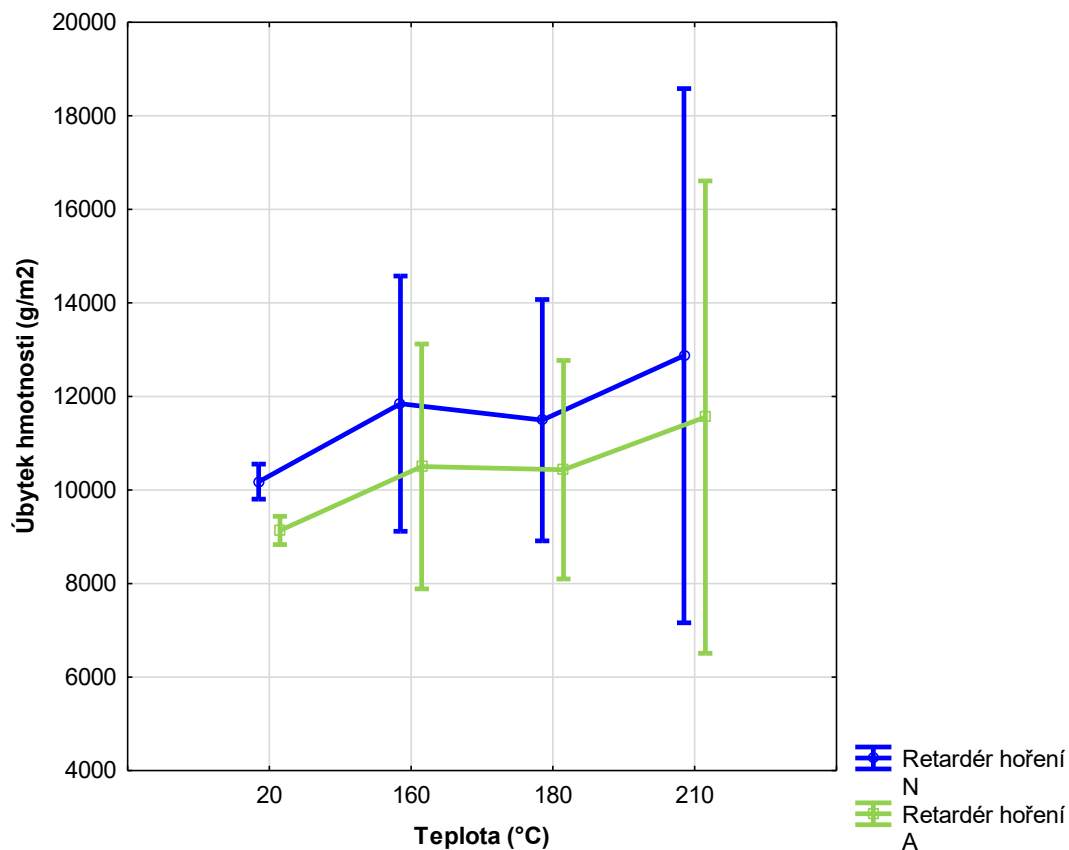
Tabulka 7 nám zobrazuje sledované faktory pro úbytek hmotnosti při působení hoření. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“ můžeme shledat, že nebylo prokázáno statistické působení jednotlivých faktorů na hodnoty úbytku hmotnosti a ani působení jejich interakce.

Tab. 7 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na úbytek hmotnosti

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	F-test	Úroveň významnosti P
Absolutní člen	4,842011E+09	1	4,842011E+09	704,5351	0,000000
Teplota	3,312869E+07	3	1,104290E+07	1,6068	0,207128
Retardér	1,415694E+07	1	1,415694E+07	2,0599	0,160923
Teplota *Retardér	1,915065E+05	3	6,383550E+04	0,0093	0,998746
Chyba	2,199243E+08	30	6,872633E+06		

Zdroj: Vlastní

Vliv termické modifikace a retardéru na úbytek hmotnosti při hoření je zobrazen na obrázku 20. Jednotlivé faktory ani jejich interakce termické modifikace s retardérem hoření dle hladiny významnosti „P“ se neprokázal jako statisticky významný.



N-bez použití retardéru; A-s přírodním retardérem hoření: Arabinogalaktan

Obr. 20 Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek teploty termické modifikace, retardéru hoření a jejich interakce na hodnoty úbytku hmotnosti.

Zdroj: Vlastní

8.2 Čas při dosažení maximální rychlosti q (A, max) (S)

V tabulce číslo 8 jsou znázorněné průměrné hodnoty času při dosažení maximální rychlosti hoření společně s variačním koeficientem pro termicky modifikované dřevo s použitím přírodním antipyrénem či bez něj.

Tab. 8 Průměrné hodnoty s variačním koeficientem na čas maximální rychlosti q (A, max) (S)

Použití retardéru	Teplota termické modifikace (°C)	Čas maximální rychlosti q (A, max) (S)	Variační koeficient (%)
Bez aplikace retardéru	20	1634,2	11,9
	160	1266,2	49,9
	180	1707,4	2,7
	210	1491,2	35,3
Aplikace přírodního retardéru	20	1483,7	12,0
	160	1139,1	49,7
	180	1599,0	3,7
	210	1338,0	35,2

Zdroj: Vlastní

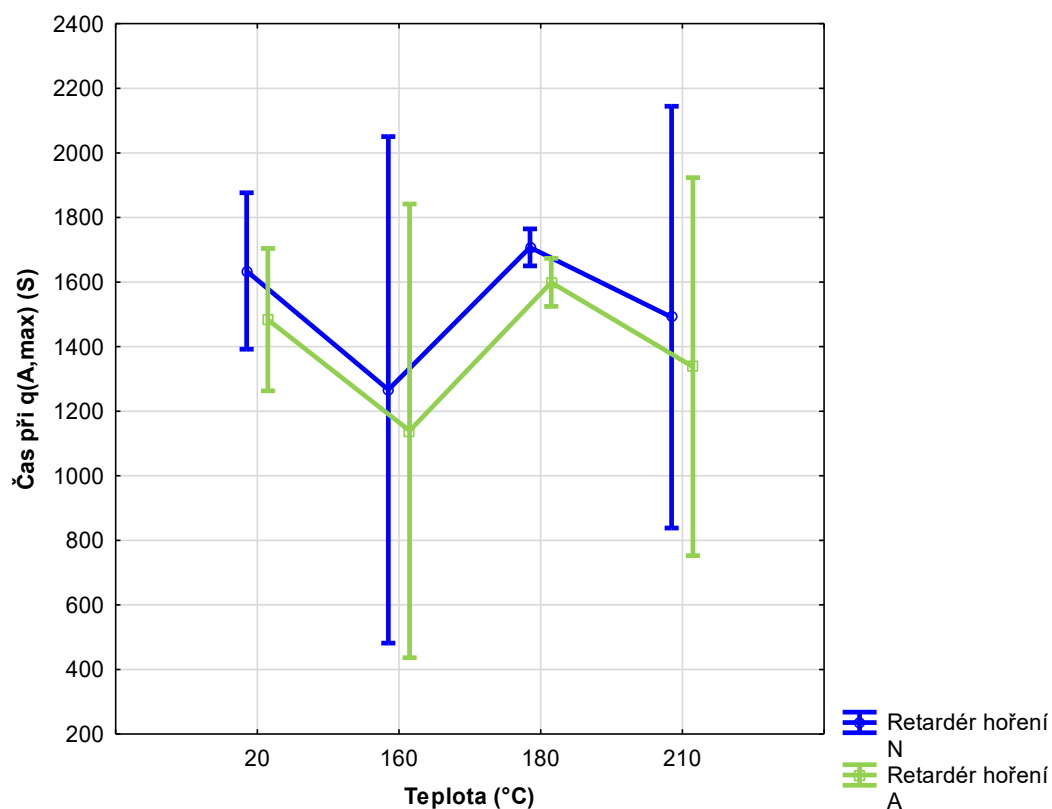
V tabulce 9 se nám ukazuje, že statisticky významné hodnoty se neprojeví u žádných ze sledovaných faktorů a ani u jejich vzájemné interakce termické modifikace s retardérem hoření. Jdená se tedy o hodnoty statisticky nevýznamné.

Tab. 9 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na čas při maximální rychlosti hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	F-test	Úroveň významnosti P
Absolutní člen	84953871,6	1	84953871,6	525,464363	0
Teplota	1153879,1	3	384626,365	2,37902575	0,0880831661
Retardér	181751,531	1	181751,531	1,12418599	0,296956392
Teplota *Retardér	3353,59481	3	1117,86494	0,00691431923	0,999192499
Chyba	5173564,72	30	161673,897		

Zdroj: Vlastní

Vliv tepelné modifikace a přírodního retardéru na čas při dosažení maximální rychlosti hoření lze pozorovat na obrázku číslo 21. Statisticky významná hodnota se nepotvrdila u žádného z daných faktorů.



N-bez použití retardéru; A-s přírodním retardérem hoření: Arabinogalaktan

Obr. 21 Graf označující 95 % interval spolehlivosti hodnotící účinek termické modifikace, retardéru hoření a jejich interakce na hodnoty času dosažené při maximální teploty hoření

Zdroj: Vlastní

8.3 Maximální rychlost hoření

Tabulka 10 znázorňuje průměrné hodnoty společně a variačním koeficientem pro maximální rychlost hoření u dřeva termicky upraveného a ošetřeného přírodním retardérem či bez jeho použití.

Tab. 10 Průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro maximální rychlost hoření

Použití retardéru	Teplota termické modifikace (°C)	Maximální rychlosti q (A, max) (kW/m ²)	Variační koeficient (%)
Bez aplikace retardéru	20	131,0	15,0
	160	284,3	48,8
	180	308,0	31,5
	210	229,0	52,6
Aplikace přírodního retardéru	20	118,4	15,4
	160	259,9	46,9
	180	283,3	33,2
	210	207,9	52,7

Zdroj: Vlastní

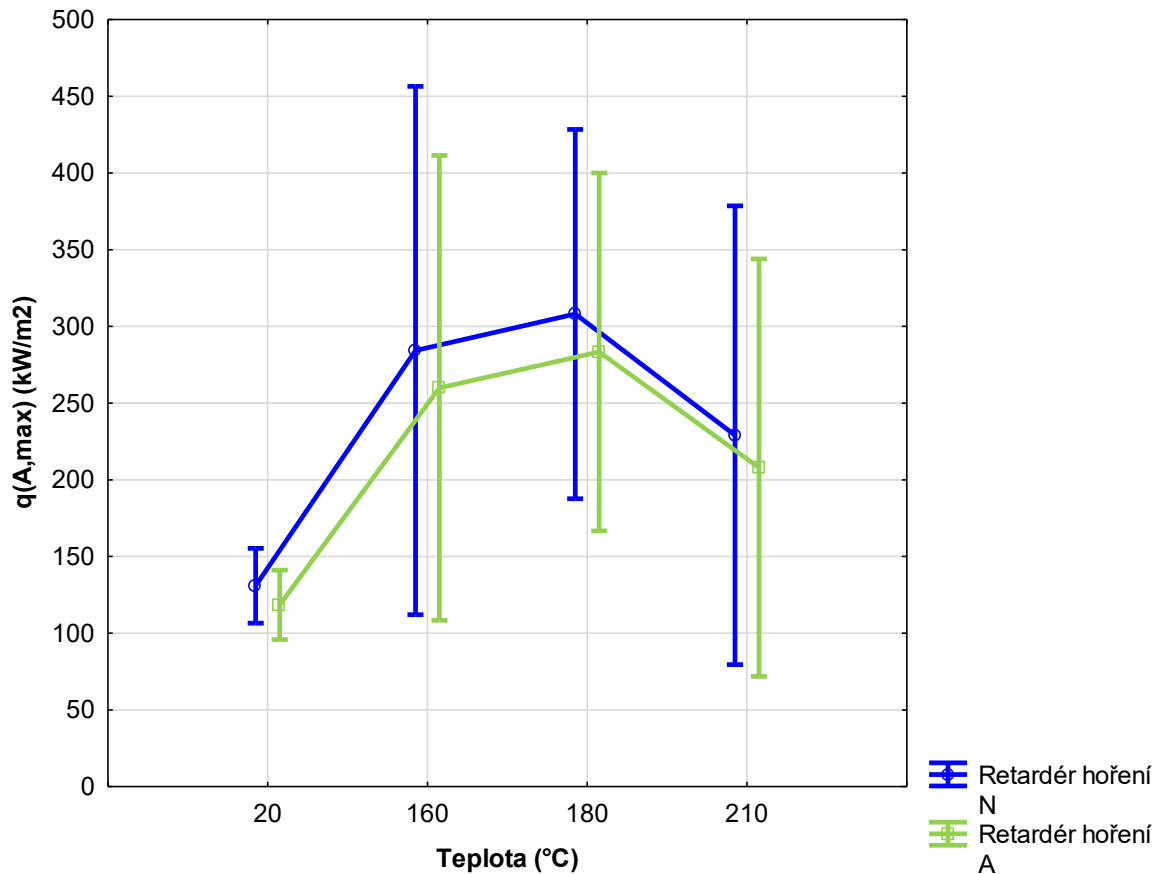
Jak můžeme vidět v tabulce číslo 11, podle dané hladiny významnosti $P < 0,05$ se teplota termické modifikace jeví jako statisticky významná, avšak u samostatného retardéru a interakce těchto dvou faktorů se statistický vliv neprokázal.

Tab. 11 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na maximální rychlost hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	F-test	Úroveň významnosti P
Absolutní člen	2074707	1	2074707	208,6078	0,000000
Teplota	172871	3	57624	5,7940	0,002786
Retardér	4281	1	4281	0,4304	0,516462
Teplota *Retardér	241	3	80	0,0081	0,998982
Chyba	318256	30	9945		

Zdroj: Vlastní

Z následujícího obrázku vyplývá vliv vztahu mezi tepelnou úpravou a přírodním retardérem na dosažení maximální teploty hoření. Statisticky významné hodnoty se nepotvrdily u žádných ze zmíněných faktorů.



N-bez použití retardéru; A-s přírodním retardérem hoření: Arabinogalaktan

Obr. 22 Graf označující 95 % interval spolehlivosti hodnotící účinek termické modifikace, retardéru hoření a jejich interakce na hodnoty maximální teploty hoření

Zdroj: Vlastní

8.4 Rychlost úbytku hmotnosti

V tabulce číslo 12 je zázorněn průměr s variačním koeficientem k charakteristice rychlost úbytku hmotnosti vlivem hoření. Rozeznáváme dřevo dle teploty termické úpravy a ošetření pomocí antipyrénu či bez jeho aplikace.

Tab. 12 Průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro rychlost úbytku hmotnosti vlivem hoření

Použití retardéru	Teplota termické modifikace (°C)	Rychlost úbytku hmotnosti (g/m²s)	Variační koeficient (%)
Bez aplikace retardéru	20	5,9	2,4
	160	6,9	19,2
	180	6,7	18,1
	210	7,0	28,2
Aplikace přírodního retardéru	20	5,4	1,0
	160	6,2	19,4
	180	6,2	17,9
	210	6,3	27,5

Zdroj: Vlastní

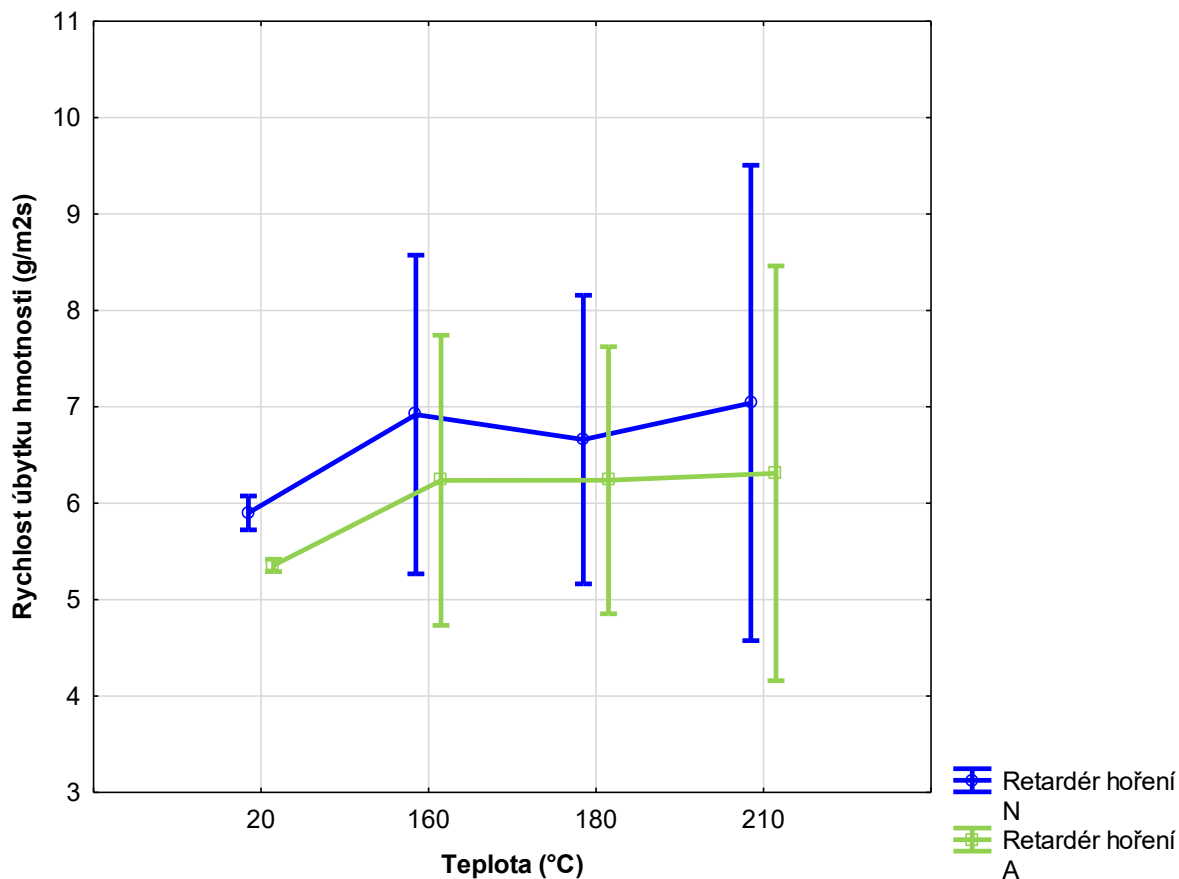
Tabulka 13 nám zobrazuje, že se neprojevil žádný statistický význam, jak u jednofaktorových faktorů, tak i u jejich interakce. To vyplývá na základě hodnot hladiny významnosti „P“.

Tab. 13 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na rychlost úbytku hmotnosti

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	F-test	Úroveň významnosti P
Absolutní člen	1604,154	1	1604,154	994,2329	0,000000
Teplota	6,884	3	2,295	1,4221	0,254421
Retardér	3,534	1	3,534	2,1904	0,148655
Teplota *Retardér	0,146	3	0,049	0,0302	0,992812
Chyba	51,631	30	1,613		

Zdroj: Vlastní

Výsledky vlivu tepelné modifikace a retardéru hoření na rychlosti úbytku hoření lze pozorovat na obrázku 22. Účinnost se nepotvrdila ani u jednoho ze zmíněných faktorů. Z grafu vyplývá, že přírodní retardér má malý vliv na oddálení rychlosti hoření.



N-bez použití retardéru; A-s přírodním retardérem hoření: Arabinogalaktan

Obr. 23 Graf označující 95 % interval spolehlivosti hodnotící účinek termické modifikace, retardéru hoření a jejich interakce na hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti

Zdroj: Vlastní

8.5 Chemická analýza

V tabulce 14 jsou znázorněny průměrné hodnoty chemické analýzy s korelačním koeficientem (CV).

Tab. 14 Průměrné hodnoty s korelačním koeficientem (CV %)

Průměrné hodnoty chemické analýzy									
Extraktiva	CV	Lignin	CV	Holocelulóza	CV	Celulóza	CV	Hemicelulóza	CV
7,96	1,38	24,82	1,19	68,40	0,53	45,31	0,44	23,09	1,98
8,14	2,17	25,43	1,42	67,37	0,46	45,95	0,62	21,41	1,62
11,40	1,48	27,54	1,30	61,45	0,47	47,42	0,71	14,03	0,78
13,52	1,36	31,58	0,91	54,50	0,59	49,47	0,48	5,03	10,69

Zdroj: Vlastní

V tabulce 15, jsou znázorněné statistické výsledky v závislosti teploty na obsahu jednotlivých složek dřeva. U všech zkoumaných chemických složek dřeva se potvrdil statistický význam na teplotě s hladinou významnosti $P = 0$, daný faktor tedy působí.

Tab. 15 Jedno-faktorová analýza rozptylu hodnotící účinek teploty na hodnoty změn chemických složek dřeva

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	F-test	Úroveň významnosti P
Extraktivní látky (%)					
Intercepce	1682,230	1	1682,230	63993,54	0,000000
TM (°C)	86,804	3	28,935	1100,70	0,000000
Chyba	0,315	12	0,026		
Lignin (%)					
Intercepce	11961,80	1	11961,80	111788,1	0,000000
TM (°C)	111,81	3	37,27	348,3	0,000000
Chyba	1,28	12	0,11		
Holocelulóza (%)					
Intercepce	63359,18	1	63359,18	611046,7	0,000000
TM (°C)	491,55	3	163,85	1580,2	0,000000
Chyba	1,24	12	0,10		
Celulóza (%)					
Intercepce	35400,42	1	35400,42	487189,7	0,000000

TM (°C)	40,85	3	13,62	187,4	0,000000
Chyba	0,87	12	0,07		
Hemicelulóza (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	4040,191	1	4040,191	25579,94	0,000000
TM (°C)	814,950	3	271,650	1719,92	0,000000
Chyba	1,895	12	0,158		

Zdroj: Vlastní

Tabulka číslo 16 ukazuje získané hodnoty korelačních koeficientů, které zobrazují stupeň závislosti vzniklý mezi vybranými charakteristikami hoření a hlavních chemických složek dřeva.

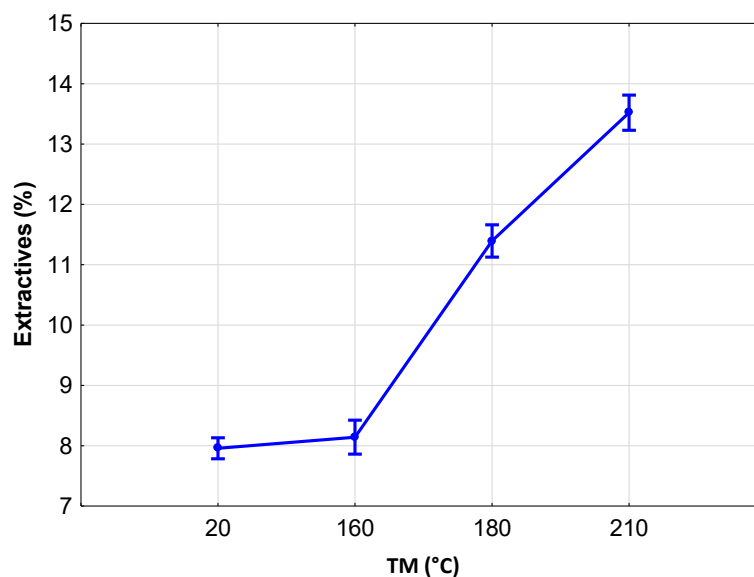
Tab. 16 Průměrné hodnoty charakteristik hoření v závislosti na chemickém složení dřeva (%)

	Extrahované látky	Lignin	Holocelulóza	Celulóza	hemicelulóza
q(A,max) (kW/m²)	0,22	0,23	0,23	0,21	0,22
Čas při q(A,max) (S)	0,01	0,01	0,9E-3	0,01	0,0019
Úbytek hmotnosti (g/m²)	0,24	0,25	0,24	0,22	0,23
Rychlost úbytku hmotnosti (g/m²s)	0,24	0,25	0,24	0,22	0,23

r = 0-nezávislé; 0 < r ≤ 0,3 – nízká závislost; 0,3 < 0,7 – střední závislost; 0,7 < r < 1 – významná závislost; r = 1 – vysoká závislost

Zdroj: Vlastní

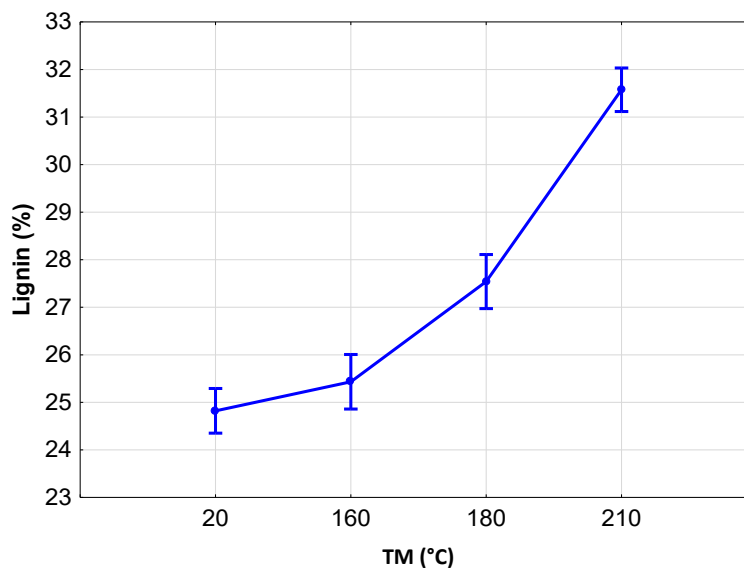
Obrázek 24 znázorňuje změnu extraktivních látek ve dřevě vlivem působení termické modifikace. Největší změna nastává při teplotě termické modifikace 180 a 210 °C.



Obr. 24: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu extraktivních látek

Zdroj: Vlastní

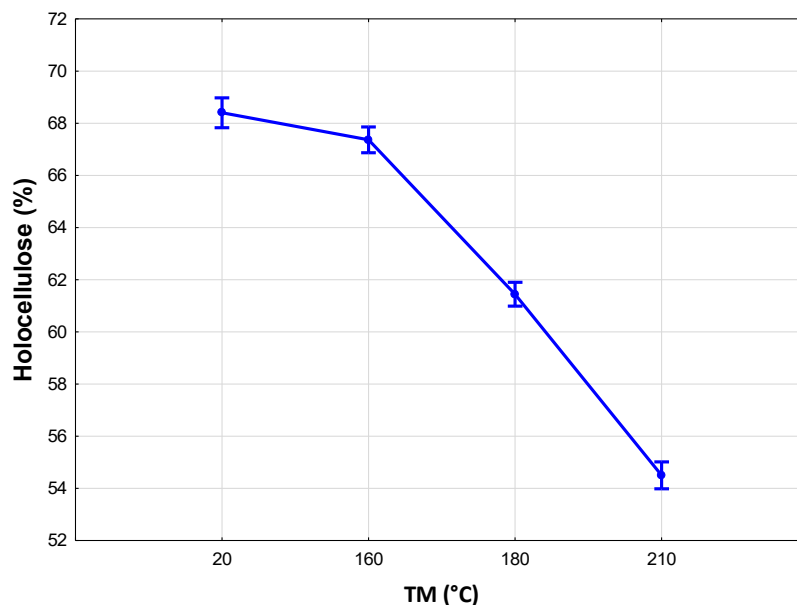
Níže zobrazený obrázek 25 zobrazuje vliv termické modifikace na změnu obsahu ligninu obsaženého ve vzorku. Z obrázku vyplývá, že obsah ligninu se zvyšuje se zvyšující se teplotou.



Obr. 25: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu množství ligninu

Zdroj: Vlastní

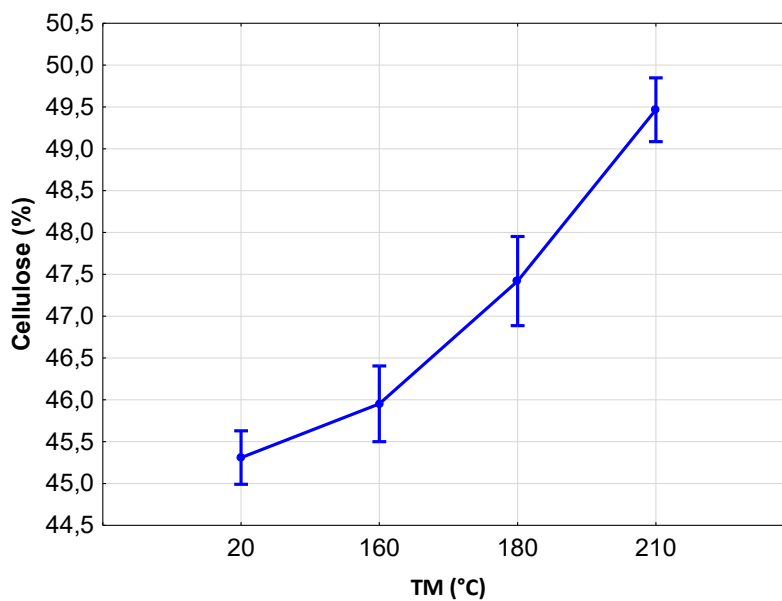
Obrázek 26 znázorňuje pokles chemické složky dřeva holocelulózy vlivem působící teploty termické modifikace.



Obr. 26: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu množství holocelulózy

Zdroj: Vlastní

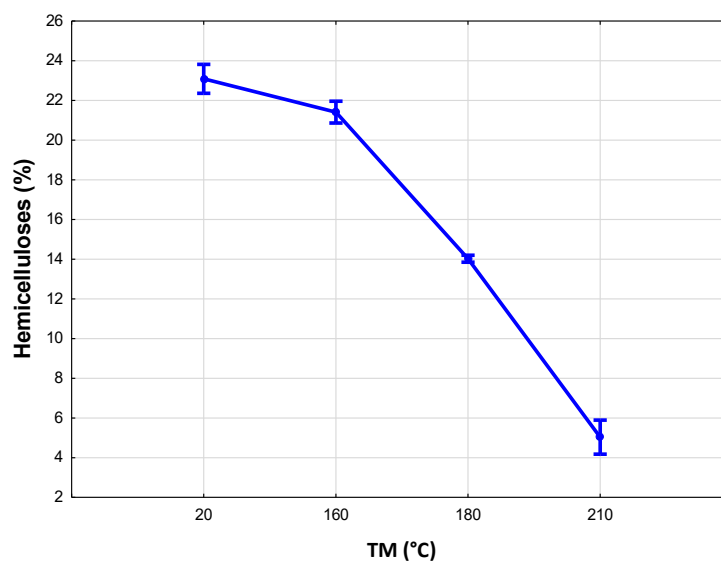
Graf zobrazený na obrázku 27 nám ukazuje účinek termické modifikace na změnu obsahu celulózy ve dřevě. Z obrázku je tedy patrné, že se zvyšující teplotou termické úpravy se zároveň zvětšuje obsah celulózy.



Obr. 27: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu množství celulózy

Zdroj: Vlastní

Obrázek 28 ukazuje, že vlivem působení teplot termické úpravy obsah hemicelulózy ve dřevě klesá.



Obr. 28: Graf 95 % intervalu spolehlivosti hodnotící účinek vlivu teploty termické modifikace na změnu množství hemicelulózy

Zdroj: Vlastní

9 Diskuze

Základem našeho měření byly dva soubory těles, tedy kdy první soubor tvořil vzorky bez ochrany retardéru a druhý soubor s přírodním retardérem hoření arabinogalaktanem. Protože jsme nezkoumali pouze vliv retardéru na rostlé dřevo, ale i na dřevo termicky upravené, jednotlivý soubor byl dělen ještě na čtyři části dle termické úpravy (160 °C, 180 °C a 210 °C) a bez termické úpravy 20 °C. Mezi sledované charakteristiky jsme zařadili úbytek hmotnosti při hoření, rychlost hoření, maximální rychlost hoření a rychlost úbytku hoření.

Všechna zjištěná data jsme následně vyhodnotili dle statistické pravděpodobnosti $P = 0,05$, abychom potvrdili či vyvrátili možný vliv sledovaných faktorů, tedy termickou modifikaci, retardér hoření a interakci termické modifikace s retardérem hoření. Tyto faktory jsme posuzovali na zmíněné charakteristiky hoření dle Fisherova F-testu s hladinou významnosti $P = 0,05$. Stejný postup vyhodnocování jsme aplikovali i na zkoumání působení zvýšené teploty na množství chemických látek dřeva. Pro objektivní porovnání statistických výsledků jsme použili již vyhodnocená statistická data, které byla získána při podobných výzkumech veřejných prací.

Při zjišťování úbytku hmotnosti vlivem hoření po dobu 1800 s⁻¹ jsme zjistili, že na základě hodnot hladiny významnosti „P“ můžeme konstatovat, že nebylo prokázáno statistické působení jednotlivých faktorů na hodnoty úbytku hmotnosti a ani působení jejich interakce. V porovnání s jiným výzkumem, který se uskutečnil na dřevině teak, vyšel přírodní retardér též bez účinku na tuto protipožární charakteristiku (Gaff, a další, 2019). Oproti jedné studii u dřeviny padouk se vliv řírodního retardéru hoření projevil na úbytku hmotnosti (Jindřich, 2018).

Další sledovanou charakteristikou je čas při dosažení maximální rychlosti hoření. U této charakteristiky se jednofaktorové vlivy termické modifikace a retardéru hoření společně s jejich interakcí termické modifikace a přírodního retardéru neprokázal statisticky významný účinek. U studie (Gaff, a další, 2019) kde byla zkoumána stejná charakteristika hoření se u dřeviny teak nepotvrdila žádná statistická významnost u sledovaných faktorů. Avšak u dřeviny padouk se u všech sledovaných faktorů dosáhlo statistické významnosti (Jindřich, 2018).

Třetí sledovanou charakteristikou hoření je maximální rychlost hoření, při které jsme zjistili, podle dané hladiny významnosti $P = 0,05$, že u teploty termické modifikace

jedná o staticky významný účinek, zatímco u retardéru hoření a interakce těchto dvou faktorů se statisticky významné hodnoty neprokázaly. Přírodní retardér vykazuje jen nízkou účinnost oproti dřevu neošetřenému antipyrénem. V porovnání s výsledky cizí studie u teakového dřeva se u přírodního retardéru a termické úpravy maximální rychlost hoření projevila jako účinná (Gaff, a další, 2019). U studie smrkového dřeva měl statisticky významný účinek jen retardér (Makovicová, a další, 2018).

Do poslední sledované požární charakteristiky patří rychlost úbytku hmotnosti. V této části práce jsme zjistili že nebylo statisticky významné působení jednotlivých faktorů ani jejich vzájemné interakce. To lze prokázat na základě hodnoty hladiny významnosti „P“.

Dalším sledovaným krokem byla chemická analýza těles, čímž jsme zjistili množství jednotlivých chemických složek dřeva (extraktivní látky, celulóza, hemicelulóza, holocelulóza a lignin) jak u termicky modifikovaných těles, tak u těles bez termické úpravy. Touto analýzou jsme zjistili změny týkajících se množství složek dřeva v důsledku působení termické modifikace. Vliv termické modifikace na chemické složení dřeva se prokázal staticky významný u všech základních složek dřeva. V této části práce jsme zjistili, že extraktivních látek ve dřevě vlivem působení termické modifikace narůstá, a největší změna nastává při teplotě termické modifikace 180 °C a 210 °C, stejně tak došlo k nárůstu i u ligninu a celulózy. Avšak u hemicelulózy a holocelulózy došlo k výraznějšímu poklesu jejich obsahu ve dřevě. S prorováním studie u dřeviny teak se vlivem tepelné modifikace zvýšil obsah extraktivních látek, ligninu a celulózy, zatím co u holocelulózy a hemicelulózy došlo k jeho poklesu (Gaff, a další, 2019).

Po shrnutí získaných výsledků můžeme říci, že přírodní retardér má vliv s přibližnou účinností 10 % na sledované charakteristiky při reakci na oheň a zapalitelnost, které jsme testovali na dřevině mahagon (*Swietenia mahagoni*). Termická modifikace měla statisticky významný vliv pouze u maximální rychlosti hoření u zbylých faktorů se jeho vliv neprokázal. Ze získaných chemických dat se potvrdila závislost na působení teploty, kdy došlo k nárůstu extraktivních látek, ligninu a celulózy, zatím co u holocelulózy a hemicelulózy došlo k poklesu.

10 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo shromáždit informace k požární charakteristice dřeva, zjistit vliv vybraných požární charakteristik a zároveň zjistit účinnost přírodního antipyrénu (arabinogalaktanu) při hoření. Toto zjišťování probíhalo na exotické dřevině mahagon (*Swietenia mahagoni*), nejen na neupraveném dřevě, ale i na dřevě termicky modifikovaném při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C a zároveň s ošetřením přírodním retardérem a bez něj.

Při testování a vyhodnocování výsledků se pracovalo dle normy (ČSN 73 0862/B-2, 1991), která je v dnešní době nahrazená novou evropskou normou. Tuto normu jsme zvolili pro snáze proveditelnou zkoušku, které nám byla dostupná a zároveň splňuje dostatečnou úroveň přesnosti.

Účinek termické modifikace na chemické složení komponentů dřeva se projevil u všech zkoumaných charakteristik jako statisticky významný na teplotě s hladinou významnosti $P = 0$, daný faktor tedy působí. Dále se projevil vliv chemických složek na vybrané charakteristiky zabývající se reakcí na oheň a zapalitelnost dřeva. U všech charakteristik, tedy úbytku hmotnosti vlivem hoření, maximální rychlosti hoření, čas při dosažení maximální rychlosti hoření a rychlost úbytku hmotnosti se projevila nízká závislost vzatá z korelačního koeficientu. Pouze u charakteristiky času při dosažení maximální rychlosti se projevila střední závislost u holocelulózy.

U získaných hodnot z chemické analýzy dřeva se prokázal vliv termické modifikace na změnu obsahu chemických složek. Došlo ke zvýšení obsahu extraktivních látek, ligninu a celulózy, zatím co u holocelulózy a hemicelulózy došlo k poklesu.

Účinek tepelné modifikace na charakteristiky reakce na oheň měl významný vliv při požární charakteristice maximální rychlost hoření, zatím co u ostatních posuzovaných faktorů a jejich interakce se vliv neprokázal.

Závěrem této práce můžeme vyhodnotit, že vliv termické modifikace se prokázal pouze u charakteristiky maximální rychlosti hoření a u ostatních sledovaných charakteristik se jeho vliv neprokázal. U vlivu přírodního retardéru hoření se prokázal vliv s přibližnou účinností 10 % na sledované charakteristiky při reakci na oheň a zapalitelnost. U interakce termické modifikace s retardérem hoření můžeme konstatovat, že se faktory projeví jako statisticky nevýznamné u dřeviny mahagon.

Citovaná literatura

Adámek, J a kol. 2004. *Studijní opora pro komb. st. Modul BI-M04 Keramika, dřevo, kovy a sklo.* Brno : CERM, 2004.

Barčík, Š a Homola, T. 2004. *Vplyv vybraných parametrov na kvalitu obrobeného povrchu při rovinom frézování juvenilního borovicového dřeva.* Zvolen : autor neznámý, 2004. ISBN 80-2281385-0.

Bartlett, A,I, Hadden, R,M a Bisby, L,A. 2018. *A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction.* [článek] School of Engineering, The University of Edinburgh, The King's Buildings : Fire Technology 5, 2018. 1-49.

Boonstra, M,J, a další. 2007. *Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents.* [článek] Wageningen, The Netherlands : ©INRA, EDP Sciences, 2007. DOI: 10.1051/forest:2007048.

Borrega, M a Karenlampi, P,P. 2010. *Hygroscopicity of heat-treated Norway spruce (Picea abies) wood.* [článek] místo neznámé : European Journal of Wood and Wood Products, 2010. 233-235.

Bučko, J a Osvald, A. 1997. *Požiarnotechnické vlastnosti dreva a materiálov na.* Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene 1997, 1997. ISBN 8022806560.

Budakci, M, a další. 2013. *Determination of the surface roughness of heat-treated wood materials planed by the cutters of a horizontal milling machine.* místo neznámé : BioResources 8(4), 2013. 3189-3199. DOI: 10.15376/biores.8.3.3189-3199.

Česká zemědělská univerzita . *CHEMICKÉ SLOŽENÍ DŘEVA & SUBMIKROSKOPICKÁ STAVBA.* [Prezentace] Praha : autor neznámý.

Darling, David. 2016. David Darling. [Online] 2016. [Citace: 20. 2 2021.] <https://www.daviddarling.info/encyclopedia/R/ribose.html>.

Dejmal, A. 2012. fraxinus.mendelu.cz. *Thermowood: přednáška č.9.* [Online] 2012. [Citace:27.12021.] https://fraxinus.mendelu.cz/vyuka/soubory/TMZD_NMS/Povinne_predmety/Modifikace_dreva/PR%20MOD%2009.pdf.

Dietenberger, M,A. 1994. *Protocol for Ignitability, Lateral Flame Spread, and Heat Release Rate Using Lift Apparatus.* Washington, DC. : ACS symposium series 599. Washington, DC: American Chemical Society, 1995., 1994.

-
- Dilik, T a Hiziroglu, S. 2012.** *Bonding strength of heat treated compressed Eastern redcedar wood*, *Materials and Design*. 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.017h, .
- Esteves, B, M a Pereira, H, M. 2009.** *Wood modification by heat treatment: A review* . místo neznámé : BioResources , 2009. DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404.
- fraximus.mendelu.cz.** *Technologie a procesy sušení dřeva: 7.* [Prezentace] Brno : autor neznámý.
- Gaff, M, a další. 2019.** *The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak*. [článek] místo neznámé : *Construction and Building Materials*, 2019. 551-558.
- Hau, K, Kwan, T,H a Li, P,K. 2009.** *Melamine Toxicity and the Kidney*. [článek] místo neznámé : *Journal of the American Society of Nephrology*, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1681/ASN.2008101065> .
- Heidingsfeld, V. 1999.** *Zpěnitelné protipožární nátěr*. místo neznámé : Praha: Společnost pro technologie ochrany památek, 2000, 1999. 80-902668-2-7..
- Hill, C,A,S. 2006.** *Wood Modification: Chemical, thermal, and Other Processes*. NJ, USA : John Eiley and Sons, 2006. 978-0-470-02172-9.
- Horský, D. 1987.** *Hydrotermická úprava a ochrana dřeva*. Zvolen : Vysoká škola lesnická a dřevařská Zvolen, 1987.
- Jankovský, Miroslav, Lachman, Ladislav a Stazsková, L. 1999.** *Chemie dřeva*. Praha : Česká zemědělská univerzita Praha, 1999.
- Jindřich, J. 2018.** *Protipožární odolnost rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného syntetickým antipyrénem;*. [Bakalářská práce] Praha : Česká zemědělská univerzita, 2018.
- Kačíková, D, Netopilová, M a Osvald, A. 2006.** *Drevo a jeho termická degradácia, 1. vydání*. Ostrava : Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2006. ISBN:80-86634-78-7.
- Kandola, B,K, Horrocks, A,R a Price, D, Coleman, G,V. 1996.** *Flame-Retardant Treatments of Cellulose and Their Influence on the Mechanism of Cellulose Pyrolysis*. [článek] místo neznámé : *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 36 (4), 1996. <https://doi.org/10.1080/15321799608014859>.
- Kawamoto, H. 2017.** *Lignin pyrolysis reactions*. [článek] Kyoto University : *Journal of Wood Science*, 63 (2), 2017. DOI:10.1007/s10086-016-1606-z.
-

-
- Khalturinskii, N,A. 1900.** *On reduction of combustibility of polymeric materials.* Berlin : International. J. Polym. Mater. 1, 1900. 14:109-125.
- Khattab, M,A. 2000.** *Decabromobiphenyl oxide–aluminum hydroxide system as a flame retardant for styrene–butadiene rubber.* [článek] místo neznámé : Journal of Applied Polymer Science/78, 2000.
- Klüppel, A a Mai, C. 2013.** *The influence of curing conditions on the chemical distribution in wood modified with thermosetting resins.* [článek] místo neznámé : Wood Science and Technology volume 47, , 2013. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0530-2>.
- Kocafe, D, a další. 2008.** *Mechanical properties, dimensional stability, and mold resistance of heat-treated jack pine and aspen.* [článek] místo neznámé : Forest products journal, 2008 June, v. 58, no. 6, p. 88-93., 2008. 0015-7473.
- Korkut, D,S a Guller, B. 2008.** *Effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (Acer trautvetteri Medw.) wood.* [článek] New York : Bioresource technology, 2008 May, v. 99, no. 8, p. 2846-2851, Elsevier Ltd., 2008, 2008. 0960-8524.
- Korkut, S,D, Hiziroglu, S a Aytin, A. 2013.** *Effect of heat treatment on surface characteristics of wild cherry wood.* místo neznámé : BioResources, 2013.
- Kretschmann, D,E, Alden, H,A a Verill, S. 1997.** *ariations of microfibril angle in loblolly pine: Comparison of iodine crystallization and X-ray diffraction techniques,“ in Microfibril Angle in Wood, Butterfield, B. G. (ed.), U. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, : Butterfield, B. G. (ed.), , 1997. pp. 157-176..*
- Kubesa, P a Horák, J. 2012.** *Proces hoření kusového dřeva. tzb-info.* [Online] VŠB, TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 2012. [Citace: 6. 4 2021.] <https://energetika.tzb-info.cz/8716-proces-horeni-kusoveho-dreva>.
- Kubiš, J. 2019.** *Termicky modifikované dřevo (Thermowood) vliv nezávislých parametrů (technicko-technologických) na závislé parametry(energetické a kvalitativní) při rovinném frézování: disertační práce.* Praha : Česká zemědělská univerzita, 2019.
- Laoutid, F, a další. 2009.** *New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites.* [článek] místo neznámé : Materials science and engineering: R: Reports, 63, 2009.
- Lee, S,H, a další. 2018.** *Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review.* Malaysia : Elsevier Ltd. 2018, Elsevier Ltd. 2018, 2018. 09500618.
-

-
- Li, T, a další. 2017.** *Response of hygroscopicity to heat treatment and its relation to durability of thermally modified wood.* [článek] China : College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Chin, 2017. 671-676.
- LIVING FUTURE. 2018.** Střední Evropa byla ještě před 6 000 lety pokryta z 80 % lesy, jejich ústup začal v době bronzové. *LIVING FUTURE.* [Online] 2018. [Citace: 27. leden 2021.] <https://www.livingfuture.cz/about.php>.
- Maiti, S, Banerjee, S a Palit, S, K. 1993.** *Phosphorus containing polymers. III. Polyimidophosphonates.* [článek] místo neznámé : Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 32, 1993. <https://doi.org/10.1002/pola.1994.080320202>.
- Makovicová, L a Gaff, M. 2018.** *Retardation effect on thermally modified spruce.* [článek] místo neznámé : wood. BioResources, 2018. 947-959.
- Mettler, M,S, a další. 2012.** *Revealing the chemistry of pyrolysis for the production of biofuels: Conversion of cellulose to furans and small oxygenates.* místo neznámé : Energy and the Environment, 5 (1), 2012. 5414-5424.
- Murtinger, K. 2006.** Dřevo a jeho spalování. *topenidrevem.cz.* [Online] 2006. [Citace: 18. 2 2021.] <http://www.topenidrevem.cz/clanky/5-drevo-a-jeho-spalovani>.
- Najmanová, H, Hejtmánek, P a Ševčík, L. 2015.** *Rychlost uvolňování tepla jako parametr pro hodnocení chování materiálů při požáru.* [článek] Praha : iMateriály.cz, 2015.
- Novák, P. 2011.** *drevostavitel.cz. Tepelná modifikace dřeva-Úvod do problematiky.* [Online] 28. 12 2011. [Citace: 24. 2 2021.] <https://www.drevostavitel.cz/clanek/tepelnamodifikace-dreva-1-dil>.
- Östman, A,L. 2017.** *Fire performance of wood products and timber structures.* [článek] místo neznámé : International Wood Products Journal, 8:2, 2017. 10.1080/20426445.2017.1320851.
- Osvald, A a Štefko, J. 2013.** *Modelový požiar dvojpodlažnej dřevostavby, 1. vydání.* Ostrava : Žilinská univerzita v Žilině, 2013. ISBN 978-80-87427-85-9.
- Petrová, Š, Soudek, P a Vaněk, T. 2015.** *RETARDANTY HOŘENÍ, JEJICH POUŽITÍ A VLIV NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ.* [referát] Praha : Laboratoř rostlinných biotechnologií, Ústavu experimentální botaniky Akademie věd České Republiky v.v.i., 2015.

Požgaj, A a kolektiv, a. 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva 2.vydanie*. Bratislava : Vydala Príroda, a.s., 1997. ISBN: 80-07-00960-4.

prokom.cz. prokom.cz. [Online] [Citace: 27. 2 2021.] <https://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood>.

Reinprecht, L a Vidholdová, Z. 2008. *“Termodrevo –Príprava, Vlastnosti aAplikácie [ThermoWood –Preparing, Properties and Applications],*. Zvolen : Monograph, Technical University in Zvolen, 2008.

Reinprecht, L. 2008. *Ochrana dreva: 1 vydání*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1863-6.

Reinprecht, L. 2001. *Procesy degradácie dreva, 3.vydání*. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2001. ISBN 80-228-1070-3.

Ross, J,R. 2010. *Wood Handbook: Wood as an engineering material*. United States Department of Agriculture : Forest Products Laboratory, 2010. General Technical Report FPL- GTR-190, 2010: 509 p. 1 v..

Rothon, R,N. 2003. *Particulate filled polymer composites (Rothon R.N. ed.), kap. 6.*, Shrewsbury : Rapra Technology Ltd., 2003.

Rowell, R,M. 2013. *Handbook of wood chemistry and wood composites. 2nd ed.* místo neznámé : Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4398-5380-1..

Rowell, R,M, Pettersen, R a Tshabalala, M,A. 2012. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites.* [článek] 2012. 9781439853801.

Sandberg, D a Navi, P. 2011. *Thermo-hydro-mechanical Processing of Wood Lausanne.* místo neznámé : EPFL Press, 2011. ISBN 978-2-940222-41-1, 249-286.

Seigel, L,G. 1969. *The projection of flames from burning buildings.* [článek] místo neznámé : Fire Technol 5, 1969. 43-51.

Schmitt, E. 2007. *Phosphorus-based flame retardants for thermoplastics.* [článek] místo neznámé : Plastics Additives and Compounding 9(3):26-30, 2007. DOI:10.1016/S1464-391X(07)70067-3.

Straka, F. 2006. *Bioplyn-příručka pro výuku a provoz bioplyných systémů 2. rozšířené vydání*. Praha : GAS s.r.o, 2006. 80-7328-029-9.

Svatoň, J. 2000. *Ochrana dřeva. 1 vydání*. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2000. ISBN 80-7157-435-X..

-
- Švec, J. 2016.** Hoření dřeva a jeho ochrana proti ohni. *docplayer*. [Online] 2016. [Citace: 28. 2 2021.] <https://docplayer.cz/9615521-11-horeni-dreva-a-jeho-ochrana-proti-ohni.html>.
- Tang, W,K a Eickner, H,W. 1968.** *Effect of Inorganic Salts on Pyrolysis of Wood, Cellulose, and Lignin Determined by Differential Thermal Analysis*. místo neznámé : USDA Forest Service Research Paper FPL 82, 1968.
- Uhrová, Ilona. 2013.** TZB-info. [Online] 2013. [Citace: 2. 28 2021.] <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomasou>.
- Vernois, M. 2000.** *Heat treatment of wood in France –state of the art*. [článek] Paris : Centre Technique du Bois et de l'Ameublement Paris, 2000.
- Wang, Y, a další. 2012.** *Performance-Based Fire Engineering of Structures*. místo neznámé : CRC Press, 2012. 978-0415557337..
- Wei, X a Guo, Y. 2019.** *Fire and shock resistance of wooden frame of buildings*. [článek] místo neznámé : International Wood Products Journal 10:1, 2019.
- Wikipedie. 2019.** Hexózy. *Wikipedie*. [Online] 2019. [Citace: 21. 2 2021.] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hex%C3%B3zy>.
- Wise, L,E, Murphy, M a D'addeico, A,A. 1946.** *Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses*. [článek] místo neznámé : Paper Trade Journal, 122 s. 35-43, 1946.
- Xu, J, a další. 2019.** *New Perspective on Wood Thermal Modification: Relevance between the Evolution of Chemical Structure and Physical-Mechanical Properties, and Online Analysis of Release of VOCs* . [článek] China : School of Engineering, Zhejiang Provincial Collaborative Innovation Center for Bamboo Resources and High-Efficiency Utilization, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China, 2019.
- zak.iss-slany.cz. 2019.** SOU Slaný. *Chemické složení dřeva*. [Online] 2019. [Citace: 27. 1 2021.] <http://zak.iss-slany.cz/?id=358&action=detail&presenter=Material>.
- Zhang, Z, a další. 2006.** *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*. [článek] 2006.
- Zhou, X, a další. 2017.** *A Critical Review on Hemicellulose Pyrolysis*. [článek] místo neznámé : Energy Technology 5 (1), 52-79, 2017. <https://doi.org/10.1002/ente.201600327>.
-

Normy

ČSN 73 0862/B-2. 1991. *Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot.* [norma] 1991.

ISO 5660-1. 2002. *Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method).* místo neznámé : Geneva: International Organization for Standardization, 2002.

ISO 5660-1. 2012. *Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate —Part 1:Heat release rate (cone calorimeter method).* místo neznámé : International standard, 2012.