

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

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

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:	Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu
Pracoviště (katedra/ústav):	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Konzultant:	Ing. Jiří Bouček



Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

- Autor práce: Jan Pánek
Studijní program: Dřevařství
Obor: Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu
Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Garantující pracoviště: Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Jazyk práce: Čeština
- Název práce: **Reakce na oheň u rostlého akátového dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného antipyrény na přírodní bázi.**
- Název anglicky: **Reaction to fire of grown acacia wood and heat-treated wood (thermowood) treated with natural-based antipyrènes.**
- Cíle práce: Základním cílem práce je zesummarizovat poznatky o vybraných požárních charakteristikách a jejich vlivu na rostlé a tepelně upravené dřevo ošetřené pomocí antipyrénu na přírodní bázi.
- Metodika: 1. Úvod
2. Analýza problematiky:
- vliv stupně termické modifikace na změny požárních vlastností různých druhů termicky modifikovaných dřevin,
- vliv aplikace přírodního antipyrénu na požární vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.
3. Přínosy a doporučení
4. Závěr
- Doporučený rozsah práce: 80 stran
- Klíčová slova: požární charakteristiky, antipyrén, thermowood
- Doporučené zdroje informací:
1. Gaff, M., Sarvašová-Kvietková, M., Gašparík, M., Slávik, M., 2016. Dependence of roughness change and crack formation on parameters of wood surface embossing. Wood Res. 61, 163–174. <http://www.centrumdp.sk/wr/201601/16.pdf>
 2. 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
 3. 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.

4. NUTSCH, Wolfgang. Příručka pro truhláře. 2., přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-14-1.
5. NUTSCH, Wolfgang. Příručka pro truhláře. 2., přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 8086706141;9788086706146
6. Park, JS., et al. 2006.: Fire performance of laminated veneer lumber (LVL) with glued-in steel rod connections
7. Terzi, E. et al. 2011.: Fire performance and decay resistance of solid wood and plywood treated with quaternary ammonia compounds and common fire retardants
8. Tewarson, A. (1994). "Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation," Journal of Fire Sciences 12(4), 329-356. DOI: 10.1177/073490419401200401
9. 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

Předběžný termín obhajoby: 2020/21 LS - FLD

Elektronicky schváleno: 27. 3. 2021
Ing. Radek Rinn
Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno: 27. 3. 2021
prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.
Děkan

Poděkování

Bakalářská práce vznikla pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. a Ing. Jiřího Boučka. Tímto bych chtěl poděkovat za veškeré připomínky, odbornou pomoc a trpělivost při vypracování této práce.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Reakce na oheň u rostlého akátového dřeva a dřeva tepelně upraveného (Thermowoodu ®) ošetřeného antipyreny na přírodní bázi vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milan Gaffa, PhD., a konzultanta Ing. Jiřího Boučka a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých literárních zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č.111/1998 Sb. O vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V..... den.....

Podpis autora

Abstrakt ve státním jazyce

Bakalářská práce si kladla za cíl prozkoumat reakci na oheň u rostlého dřeva tepelně upraveného a ošetřeného přírodním retardérem hoření arabinogalaktanem. V teoretické části jsme se skrze literární prameny seznámili s problematikou ochrany dřeva před hořením. Svou pozornost jsme zaměřili především na konkrétní metodu ochrany dřeva skrze přírodní retardér arabinogalaktan. Díky poznatkům nabytým z literatury jsme mohli přistoupit k experimentální části.

Do experimentu jsme jako příkladnou dřevinu zvolili akát (*Robinia Pseudoacacia*). Ten jsme podrobili výzkumu, připravené vzorky jsme následně díky metodě ThermoWood® tepelně modifikovali na vybrané teploty 160 °C, 180 °C, 210 °C. Jako čtvrtou teplotu jsme zvolili kontrolní neošetřenou (referenční vzorek) 20 °C, což byla teplota tepelně neupravovaná. Vzorky jsme si následně rozdělili do skupin, které obsahovaly dřevo všech čtyř uvedených teplot. Každou skupinu pak odlišovala její ochranná úprava, kdy jsme pracovali se skupinou ošetřenou přírodním retardérem hoření (arabinogalaktan), syntetickým retardérem hoření (Flamgard) a třetí skupina byla ponechána jako referenční, bez retardéru hoření. Vše jsme měřili pomocí normy ISO 5660-1 na kónickém kalorimetru. Naměřené hodnoty všech skupin, tedy vzorků s přírodním retardérem, vzorky bez retardéru a vzorky ošetřené syntetickým retardérem jsme vzájemně porovnali.

Měření nám prokázalo různé vlivy faktorů na vybrané charakteristiky hoření a na chemickou stavbu dřeva. Prokázalo se, že účinek přírodního retardéru na charakteristiky popisující reakci dřeva na oheň byl mírný cca 10 %, v případě syntetického retardéru byla účinnost vyšší cca 30 %. Co se chemického rozboru týče, u něj jsme dokázali závislost teploty na obsahu složek dřeva.

Klíčová slova: požární charakteristiky, antipyrén, ThermoWood,

Abstrakt v cizím jazyce

The aim of this bachelor thesis is to investigate the reaction of grown, heat-treated wood and wood treated with a natural flame-retardant arabinogalactan to fire. In the theoretical part, we acquainted through the literary sources with the issue of wood protection against burning. We focused mainly on a specific method of wood protection through the natural retarder arabinogalactan. With the knowledge acquired from the literature, we were able to proceed to the experimental part.

In the experiment, we chose acacia (*Robinia Pseudoacacia*) as an exemplary tree. It was subjected to research and the prepared samples were subsequently thermally modified using the thermowood method to the selected temperatures of 160 ° C, 180 ° C, 210 ° C. As the fourth temperature we chose 20 ° C, where thermally untreated wood was used. We further divided the samples into groups containing wood of all four temperatures. Each group was distinguished by its protective treatment. We worked with a group treated with a natural flame retardant (arabinogalactan), a synthetic flame retardant (flamgard) and the third group was left as a reference without a flame retardant. All the measurements were done on a conical calorimeter in accordance with ISO 5660-1 standard. The measured values of all groups, i.e. samples with natural retarder, samples without retarder and samples treated with synthetic retarder, were compared with each other.

The measurements showed us various effects of factors on selected combustion characteristics and on the chemical structure of wood. It was shown that the effect of the natural retarder on the characteristics describing the reaction of wood to fire was mild about 10 %, in the case of synthetic retarders the efficiency was higher than about 30 %. As for the chemical analysis, we proved the dependence of temperature on the content of wood components.

Key Words: Flame characteristics, Antipyrène, ThermoWood

Obsah

Obsah	8
Seznam ilustrací	11
Seznam tabulek	13
Seznam zkratk a značek	15
Úvod	16
1 Cíl práce	18
2 Dřevo z hlediska hoření	19
2.1 Vlastnosti dřeva vzhledem k hořlavosti	19
2.2 Proces hoření	20
2.3 Teorie hoření dřeva.....	21
2.4 Mechanismus hoření dřeva.....	23
2.5 Faktory ovlivňující proces hoření.....	24
2.5.1 Teplota hoření	27
2.5.2 Fáze hoření dřeva	28
2.5.3 Vizuální změny dřeva při hoření.....	29
2.6 Stanovení hloubky zuhelnatění.....	30
3 Termická modifikace dřeva	32
3.1 Termická úprava PLATO	32
3.2 Termická úprava olejem (OHT)	33
3.3 Termická úprava Royal proces	33
3.4 Termická úprava Retifikační proces.....	33
3.5 ThermoWood ®.....	33
3.5.1 Výrobní proces ThermoWood ®	34
3.6 Biologická odolnost.....	34
3.7 Hygroskopicita termodřeva	35
3.8 Povětrnostní odolnost termodřeva	35
3.9 Pevnost termodřeva	36
4 Retardéry hoření	37
4.1 Přírodní retardér hoření Arabinogalaktan.....	37
4.2 Ochranné látky na snížení zápalnosti a hořlavosti dřeva.....	38
4.3 Fyzikální účinky retardérů hoření	38

4.3.1	Omezení přenosu hmoty	38
4.3.2	Omezení přenosu tepla.....	39
4.3.3	Zredukování hořlavých plynů	40
4.4	Chemické ochranné prostředky na dřevo proti ohni.....	40
4.5	Způsoby aplikace retardérů hoření	41
4.6	Retardér hoření a jeho povrchové úprava.....	42
4.7	Hloubková impregnace retardéru hoření	43
4.8	Metody hodnocení hořlavosti dřeva	43
4.8.1	Hodnocení protipožární odolnosti dřeva.....	43
5	Metodika	48
6	Metodika experimentální práce	49
6.1	Příprava zkušebních vzorků	49
6.1.1	Tepelná modifikace.....	49
6.2	Značení zkušebních vzorků	50
6.3	Vážení zkušebních vzorků.....	50
6.4	Úprava zkušebních vzorků	51
6.5	Měření na kónickém kalorimetru	52
6.5.1	Kalibrace	52
6.5.2	Měření na kónickém kalorimetru.....	55
6.5.3	Sledované parametry na charakteristiky hoření.....	55
6.6	Chemická analýza.....	56
7	Výsledky a diskuse	57
7.1	Hustota.....	58
7.2	Hmotnost	59
7.3	Maximální hodnota uvolněného tepla na jednotku plochy.....	60
7.4	Čas k dosažení maximální rychlosti hoření.....	63
7.5	Celkové teplo.....	66
7.6	Hmotnosti při dosažení trvalého plamene	69
7.7	Hmotnost po ukončení testu	72
7.8	Úbytek hmotnosti	75
7.9	Rychlost úbytku hmotnosti.....	78
7.10	Rychlost úbytku hmotnosti hoření 10–90 %	81
7.11	Marhe maximální průměr vyřazovaného tepla.....	84
7.12	Efektivní spalné teplo	87

7.13 Chemická analýza.....	90
8 Závěr.....	97
Seznam použité literatury	100

Seznam ilustrací

Obrázek 1: Schéma materiálových a energetických bilancí při hoření a fotosyntéze ...	21
Obrázek 2: Faradayův trojúhelník hoření	22
Obrázek 3: Rotační model hoření	23
Obrázek 4: Mechanismus hoření dřeva	24
Obrázek 5 Chemické složení dřeva	27
Obrázek 6: Vizuální změny dřeva při hoření	30
Obrázek 7: Příklad zvyšování trvanlivosti ThermoWood dřeva z borovice při teplotě 100 až 240 ° C	35
Obrázek 8: Arbinogalaktan	37
Obrázek 9: Proces změny intumescentních nátěrů za pomoci dřeva	39
Obrázek 10 Váha na kónickém kalorimetru	51
Obrázek 11 Úprava vzorku Arabinogalaktanem a Flamgardem	52
Obrázek 12 Fotka záznamu kalibrace	53
Obrázek 13 Kónický kalorimetr	54
Obrázek 14 Měření na kónické kalorimetru	55
Obrázek 15: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na maximální hodnotu uvolnění tepla na jednotku plochy	62
Obrázek 16: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na čas k dosažení maximální rychlosti hoření	65
Obrázek 17: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na celkové teplo	68
Obrázek 18: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na hmotnost trvalého plamene	71
Obrázek 19: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na hmotnost po ukončení testu	74
Obrázek 20: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na úbytek hmotnosti	77
Obrázek 21: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na rychlost úbytku hmotnosti	80
Obrázek 22: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na rychlost úbytku hmotnosti hoření 10-90 %	83
Obrázek 23: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na maximální průměr vyzařovaného tepla (Marhe)	86
Obrázek 24: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na sledovanou charakteristiku efektivní spalné teplo	89

<i>Obrázek 25:</i> Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu extraktu	90
<i>Obrázek 26:</i> Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu ligninu	91
<i>Obrázek 27:</i> Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu holocelulozy	92
<i>Obrázek 28:</i> Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu celulózy	92
<i>Obrázek 29:</i> Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu hemicelulózy	93

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hustota dřeva	20
Tabulka 2 Chemické složení dřeva některých domácích dřevin	26
Tabulka 3: Teploty plamene	27
Tabulka 4: Třídy a reakce na oheň.....	28
Tabulka 5: Reakce na oheň podlahových krytin.....	45
Tabulka 6: Reakce na oheň podlahových krytin.....	46
Tabulka 7 Termická modifikace	49
Tabulka 8 Hustota před a po tepelné modifikaci	58
Tabulka 9 Hustota před a po úpravě retardéry hoření.	58
Tabulka 10: Hmotnosti vzorků	59
Tabulka 11 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu maximálních hodnot uvolňování tepla na jednotku plochy	60
Tabulka 12 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku maximální hodnoty uvolněného tepla na jednotku plochy a jejich interakci .	61
Tabulka 13 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu času k dosažení maximální rychlosti hoření	63
Tabulka 14 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku času k dosažení maximální rychlosti hoření a jejich interakci.....	64
Tabulka 15 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu celkového tepla.....	66
Tabulka 16 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku celkového tepla a jejich interakci.....	67
Tabulka 17 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu hmotnosti trvalého plamene	69
Tabulka 18 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku hmotnosti při trvalém plamenu a jejich interakci	70
Tabulka 19 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu hmotnosti po ukončení testu	72
Tabulka 20 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku hmotnost po ukončení testu a jejich interakci.....	73
Tabulka 21 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu úbytku hmotnosti ...	75
Tabulka 22 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku úbytku hmotnosti a jejich interakci.....	76
Tabulka 23 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu rychlost úbytku hmotnosti	78

<i>Tabulka 24</i>	Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku rychlost úbytku hmotnosti a jejich interakci.....	79
<i>Tabulka 25</i>	Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu rychlosti hmotnosti hoření 10-90%.....	81
<i>Tabulka 26</i>	Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku rychlost úbytku hmotnosti 10–90 % a jejich interakci.....	82
<i>Tabulka 27</i>	Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu Marhe maximálního průměru vyzařovaného tepla.....	84
<i>Tabulka 28</i>	Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku maximálního průměru vyzařovaného tepla (Marhe) a jejich interakci.....	85
<i>Tabulka 29</i>	Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu efektivního spalného tepla.....	87
<i>Tabulka 30</i>	Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku efektivní spalné teplo a jejich interakci	88
<i>Tabulka 31</i>	Průměrné hodnoty a variačního koeficientu	90
<i>Tabulka 32</i>	Jednofaktorová anlyza rozptylu hodnotící účinek teploty na hodnortu změn chemických komponentů	94
<i>Tabulka 33</i>	Hodnoty korelačního koeficientu mezi chemickými komponenty a sledovanými charakteristikami	95

Seznam zkratek a značek

mm	milimetr, jednotka míry
g	gramy, jednotka hmotnosti
m	hmotnost
v	rychlost vypalování
s	sekunda, jednotka času
OHT	tepelná úprava olejem (Oil Heat Treatment)

Úvod

Dřevo je materiál, který byl a je nedílnou součástí našeho života už od dávné historie. Doba, kdy se dřevo používalo jen jako zdroj tepla nebo pro tvorbu náčiní je dávno za námi. Dnes se dřevěné materiály dají najít v různých odvětvích například jako konstrukční prvky ve stavebnictví, sportovní pomůcky, ve výrobě hudebních nástrojů, nábytkářském průmyslu nebo manipulační pomůcky jako obaly a držáky pro přepravu.

Dřevo stejně jako každý materiál má své výhody a nevýhody. Mezi ceněné vlastnosti dřevěných materiálů patří jeho snadná opracovatelnost, nízká hmotnost vzhledem k vysoké pevnosti, dobrá dostupnost, obnovitelnost zdrojů, přitažlivý design a poměrně jednoduchá možnost spojení s jinými materiály. (Jelle, 2011) Při práci se dřevem nesmíme zapomínat na jeho nevýhody, mezi nejproblematictější patří proměnlivé vlastnosti dřeva v různých směrech materiálu nebo prostředí, odlišná struktura dřeva, bobtnání, sesychání, vady ve dřevě, nízká rezistence proti škůdcům a také hořlavost. (Asdrubali, a další, 2017) Zejména ve stavebnictví je kladen důraz na bezpečnost použití, dřevěné materiály musí splňovat zejména normy pro hořlavost a zápalnost dřeva.

U zápalnosti a hořlavosti dřeva bych chvíli zůstal. Tomuto tématu se chci věnovat ve své bakalářské práci. Vzhledem ke stoupající popularitě dřevostaveb. S tím však rostou požadavky na snižování zápalnosti dřeva a zpomalení hoření. Dá se očekávat, že nároky budou stále vyšší, protože podléhají evropským normám, které jsou velice přísné. Proto je důležité této problematice věnovat náležitou pozornost a uplatňováním poznatků dřívějších i nejmodernějších výzkumů předejít možným budoucím škodám, jak materiálním, ekonomickým, ale zejména těm na lidských životech. V dnešní době vývoj pokročil a již máme celou řadu možností, jak zvýšit ochranu dřevěného materiálu před ohněm. Tyto způsoby mohou velmi zpomalit postup hoření, nebo v případě malého zdroje ohně úplně zastavit šíření požáru. (Costes, Laoutid, Brohez, & Dubois, 2017)

V práci se nebudu věnovat jen rostlému dřevu, ale také tepelně upravenému, modifikovanému, dřevu (ThermoWood®). Modifikované dřevo se vyrábí pro zachování nebo zlepšení stávajících vlastností, zejména pevnosti, plastičnosti, pružnosti, hmotnosti. Dále nabízí odstranění nežádoucích vlastností, jako nízké odolnosti vůči povětrnostním podmínkám a biotickým škůdcům.

Ve své práci jsem se zaměřil na reakci na oheň u akátového dřeva, kterou budu zkoumat za pomoci ochranného nátěru (retardéru hoření) proti ohni takzvaného

antipyrinu na přírodní bázi. Porovnáním a vyhodnocením vzorků se získáme odpověď na otázku, jaká je reakce na oheň při použití přírodního retardéru, syntetického retardéru i u tepelně modifikovaného dřeva.

1 Cíl práce

Hlavním cílem práce je porovnat výsledky měření tří různých skupin vzorků akátového dřeva rozdělených podle způsobu úpravy chránící vzorky před požárem. Aby bylo tohoto cíle dosaženo, je třeba sledovat cíle dílčí.

Prvním takovým dílčím cílem je seznámení se s teorií reakce dřeva na oheň skrze literární poznatky a následná analýza nabytých znalostí.

Po nabytí teoretických vědomostí je možné přejít k experimentální části, která se stane nezbytným prostředkem k dosažení hlavního cíle. Cílem experimentu tak je měření jednotlivých skupin vzorků a zaznamenání jejich reakcí na oheň. Součástí je ověření působení přírodního retardéru hoření (arabinogalaktan), syntetického retardéru hoření (flamgard) a tepelně upraveného dřeva na vzorcích akátu (*Robinia pseudoacacia*).

Zhodnocení výsledků ověří možnost použití přírodního retardéru hoření a termické modifikace pro využití v praxi. V dnešní době je stále větší tlak na používání přírodních materiálů, problematika jejich přírodní ochrany bez použití toxických látek, zdraví škodlivých látek se tak stává velmi důležitou a je třeba jí věnovat zvýšenou pozornost.

2 Dřevo z hlediska hoření

2.1 Vlastnosti dřeva vzhledem k hořlavosti

Dřevo je materiál, který snadno hoří, což je jeho určitá nevýhoda. Při porovnání s jinými stavebními materiály (plasty, kovy), které se při požáru taví, ztrácejí svůj objem a jinak se deformují, dřevo i při hoření dlouho zůstává pevné a kompaktní (Žák, 1998).

Pro správné pochopení je třeba definovat pojmy jako požár, spalování, hoření.

- **Požár** – je nekontrolované hoření, které nemá předem ohraničenou plochu,
- **Spalování** – je většinou pojímáno jako rychlá termická oxidace paliva kyslíkem za velkého vývinu tepla,
- **Hoření** – tak bývá nazývána většina chemických reakcí, jako samovolných oxidačních látek, které za přítomnosti oxidovadla probíhají po iniciaci za vývinu světla a tepla, nejčastěji mezi plynou nebo pevnou hořlavinou a plynným oxidovadlem (Svatoň, 2000).

Každé dřevo je trochu jiné, nemá stejné vlastnosti, jelikož se jedná o heterogenní materiál. Ať se jedná o jeho hustotu nebo jeho chemické složení. Jeho hořlavost je, díky těmto faktorům odlišná a ovlivňuje parametry hoření. Struktura dřeva má vliv na jeho trvanlivost. Můžeme ji posuzovat na několika úrovních. Při pozorování pouhým okem (tzv. makroskopická struktura) lze sledovat hrubost nebo hladkost povrchu, která také ovlivňuje hořlavost dřeva. Čím hladší povrch dřeva, tím lépe odráží energii sálavého a plamenného zdroje. Proto je hůře zápalný než dřevo s drsným povrchem (Svatoň, 2000).

Různé vady dřeva (trhliny, popraskání) usnadňují proniknutí plamene do dřeva, a tím ovlivňují rychlost jeho hoření. Z mikroskopického hlediska má na odolnost vůči hoření vliv pórovitost jednotlivých dřevin nebo přítomnost jádra s různým obsahem tříslovin a pryskyřic. Každé dřevo má kapilární systém, přes který mohou proudit zápalné plyny, volným průchodem kyslíku přes kapilární systém dojde k zajištění vhodných podmínek pro hoření. Přítomnost jádra zhoršuje propustnost dřeva a často je důležitým až rozhodujícím faktorem protipožární ochrany, neboť komplikuje napouštění dřeva ochrannou látkou (Požgaj, 1993).

Dřevo je heterogenní organická hmota. Z hlediska chemického složení jsou základními stavebními prvky dřeva tři chemické prvky: uhlík, kyslík a vodík (cca 49,5 % uhlíku, 44,2 % kyslíku a 6,3 % vodíku). Z nich jsou tvořeny nejpodstatnější složky dřeva

– celulóza, hemicelulóza a lignin. Z nich je nejvíce zastoupena celulóza jako stavební materiál buněčných stěn (Požgaj, 1993).

Za běžných podmínek jsou uhlík, vodík a kyslík v makromolekulách vzájemně propojené chemickými vazbami. Zvyšováním teploty dojde k oslabení těchto vazeb a postupně k jejich přerušení a rozpadu makromolekul na malé částice, který je doprovázen změnou na plynné skupenství. Reakcí těchto plynných látek s kyslíkem dochází k reakcím za vzniku tepla. Pokud je teplo absorbováno dřevem, dochází k sušení, pokud je teplo uvolňováno do okolí, probíhá oxidace (hoření) (Kupilík, 2006).

Dřevo s větší hustotou je odolnější než dřevo s nižší hustotou viz tabulka:

Tabulka 1 Hustota dřeva

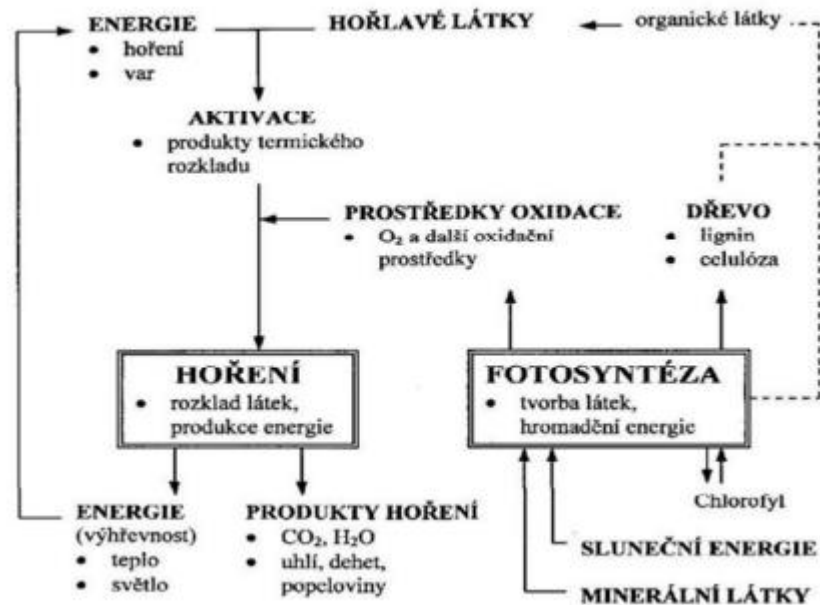
Hustota kg/m ³	Klasifikace	příklad
Nad 1200	Dřevo velmi vysoko odolné vůči ohni	quajac
900-1200	Dřevo vysoko odolné vůči ohni	Bruyere, eben, zimostráz
600-900	Dřevo středně odolné vůči ohni	Habr, akát, tis, dub, ořech
400-600	Dřevo málo odolné vůči ohni	Smrk, borovice, topol, vrba
200-400	Dřevo velmi málo odolné vůči ohni	vejmutovka
Pod 200	Dřevo obzvlášť málo odolné vůči ohni	balza

Zdroj: (Svatoň, 2000)

2.2 Proces hoření

Dřevo obsahuje přírodní polymery (celulóza, hemicelulóza, lignin) a má v sobě velké množství energie. Zpětné uvolňování energie dochází v případě působení plamenem, sálavého tepla a jiných dalších faktorů. Právě ve chvíli, kdy dojde k poklesu celulózy, hemicelulózy a ligninu se produkují hořlavé plyny a tomu se říká zpětné

uvolňování energie. V případě vysokého tepla se kyslík začne mísit s hořlavými plyny, které uvolní oxidy uhlíku, a uvolní veliké množství energie, které má vliv na ohřev a pyrolýzu dřeva. Dřevo se obejde bez vnějšího zdroje tepla ve chvíli, kdy dojde k vznícení hořlavých plynů. Teplota pro vznícení hořlavých plynů je okolo 250 ° C poté může dřevo samovolně hořet (Osvald A. Š., 2013).



Obrázek 1: Schéma materiálových a energetických bilancí při hoření a fotosyntéze

Zdroj: (Netopilová, 1996)

Za hoření dřeva můžeme považovat světelné záření s tepelným zdrojem. Při oxidační reakci dochází k vzniku dvou plamenů, studeného a horkého, každý z nich má svoji dobu, ve které se vyskytuje. Studený plamen se projevuje především v reakci střední, když ve finální fázi reakce se objevuje horký plamen, a právě s ním je spojený požár (Štroch, 2010).

2.3 Teorie hoření dřeva

Hoření dřeva je chemickou reakcí, při které dochází k rychlé oxidaci hořlavé látky při vysokých teplotách a produkci tepla. Hoření dřeva je ovlivněno fyzikálními a chemickými vlastnostmi dřeva a anatomickou stavbou dřeva. Nižší hořlavost se projevuje

u vyšší objemové hmotnosti dřeva. (Svatoň, 2000) Když se dřevo postupně zahřívá při zvýšených teplotách, začnou v jeho struktuře docházet ke změnám, které se zrychlí dalším zvyšováním teploty. Tři polymerní složky ve dřevě se začínají tepelně rozkládat na směs těkavých plynů, dehtu (levoglukosan) a uhlíkatého uhlí. Rozklad je často považován za superpozici mechanismů rozkladu jednotlivých složek: hemicelulóza se rozkládá nejprve 180–350 ° C, posléze celulóza 275–350 ° C a lignin 250–500 ° C. Tepelná stabilita ligninu je považována za způsobenou jeho silně zesítenou strukturou a vysokou molekulovou hmotností (Lowden & Hull, 2013)

Při teplotách nad 180 ° C obvykle nastává hoření, které ovlivňují tři faktory:

- 1) Hořlavost materiálu
- 2) Energetický zdroj:
 - a) vnější – plamen, zdroj sálavý, mikrovlnný, dielektrický, žhavé těleso, elektrická jiskra atd.
 - b) vnitřní – teplo produkované rozkladem dřeva
- 3) Oxidovadlo – kyslík, vzduch

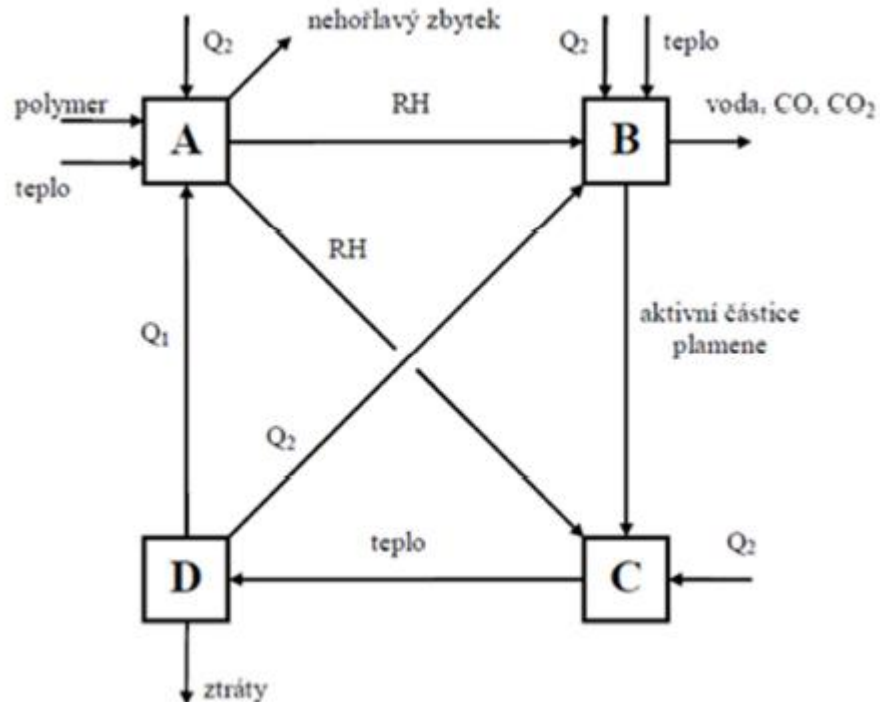
Hořlavým souborem nazýváme hořlavý materiál a oxidovadlo (Svatoň, 2000).



Obrázek 2: Faradayův trojúhelník hoření

Zdroj: (Paroc, 2020)

Trojúhelník byl sestaven na základě rotačního modelu hoření:



Obrázek 3: Rotační model hoření

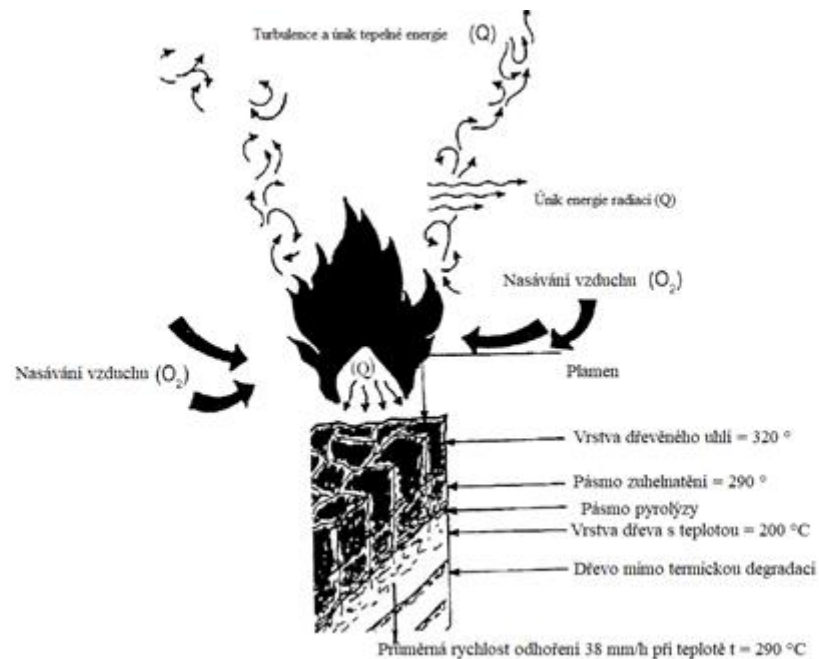
Zdroj: (Košík, Šurina, Lapčík, Růčka, & Reiser, 1983)

V první fázi se v bodě A začíná působit venkovní zdroj tepla spolu s polymery. Během první fáze v bodě A nastává termo oxidační rozklad, který uvolňuje teplo a začínají unikat plyny. V bodě B dochází k obohacení kyslíkem a působení tepla, díky tomu dochází k produkci nehořlavých produktů například voda a CO_2 . V bodě C se vytváří značné množství tepla, které je obohaceno o palivo zmenšené o ztráty v bodě D, kde se odvádí do bodů A i B. Q_1 a Q_2 jsou tepelné toky které musí nabrat na síle, aby jejich rychlost proudění mezi ABCDA a BCBDA byla stejná a rovnoměrná. Jen v případě udržení těchto faktorů může dřevo hořet bez vnějšího zdroje (Reinprecht, 2001).

2.4 Mechanismus hoření dřeva

Různé teploty odlišně působí na dřevo. Krátkodobé působení teplot do $100\text{ }^\circ\text{C}$ má za následek odpaření se zbývající vody, ale vlastnosti dřeva se příliš nemění. Při dlouhodobém působení tepla již byly pozorovány negativní následky v mechanických vlastnostech. V dřevě se začínají objevovat trhliny. Do $150\text{ }^\circ\text{C}$ je rozklad dřeva pomalý, ale od $180\text{ }^\circ\text{C}$ je značně intenzivnější. Ke krátkému vzplanutí hořlavých plynů dochází

při 200 °C, kdy měkne lignin a rozkládá se celulóza a hemicelulóza. Okolo 300 °C se dřevo vznítí a objevuje se trvalý plamen. Vzniká tenká zuhelnatělá vrstva. Samovolné vznícení a hoření hořlavých plynů lze sledovat od 300 °C. Dřevo začíná žhnout a zvětšuje se tloušťka zuhelnatělí od 500 °C (Svatoň, 2000).



Obrázek 4: Mechanismus hoření dřeva

Zdroj: (Reinprecht, 2008)

2.5 Faktory ovlivňující proces hoření

Při požáru lze určit dvě základní skupiny faktorů, které na něj mají vliv.

Hlavní faktory:

- anatomická stavba dřeva,
- fyzikální vlastnosti dřeva,
- chemické složení dřeva,

Vedlejší faktory:

- okolí objektu,
- atmosférické vlivy,
- zdroj tepla,

Stavba dřeva má dopad na hoření, díky jeho mikroskopické stavbě mohou pronikat zápalné plyny s kyslíkem přes vodící elementy a kapilární systém. Dřeviny jsou odlišné, mají odlišnou hustotu velikost rozměry a stejně tak i jejich síť vodících kanálků je jiná než u ostatních dřevin. Avšak dopad stavby dřeva na hoření není zas tak důležitý. U hustoty dřeva můžeme tvrdit, že když hustota dřeva je nižší, tak je odolnost dřeva vůči ohni nižší. Také chemické složení má jistý dopad na hořlavost dřeva. Klíčové je podíl hlavních složek dřeva ligninu, hemicelulózy a celulózy. Každá dřevina má zastoupení těchto látek maličko odlišné. Jiné procento hlavních složek dřeva dává dřevinám rozdílnou odolnost, protože i každá hlavní složka má jinou teplotní odolnost (Svatoň, 2000).

Hemicelulóza je obvykle první složkou dřeva, která prochází tepelným rozkladem. Teploty, při kterých tato reakce začíná, jsou uváděny v širokém rozmezí od 120 ° C do 180 ° C, 200 ° C až 260 ° C, 220 ° C až 315 ° C nebo 200 ° C až 300 ° C (Dietemberger & Hasburgh, 2016). Tento teplotní rozsah závisí na rychlosti ohřevu, druhu, hustotě nebo obsahu vlhkosti.

Celulóza je obvykle další sloučeninou, která se rozloží, přičemž teploty rozkladu (které pravděpodobně mají stejné závislosti jako u hemicelulózy) jsou uváděny jako 240 ° C až 350 ° C, 250 ° C až 350 ° C, 315 ° C až 400 ° C, 280 ° C až 400 ° C nebo 300 ° C až 350 ° C (Dietemberger & Hasburgh, 2016). Celulóza se může rozkládat přes dva hlavní procesy: první, při kterém vzniká dřevěné uhlí, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a H₂O, druhým je štěpení řetězce, kdy je přerušena vazba v polymerním řetězci a molekuly levoglukosanu se mohou odtrhnout, obvykle při teplotách kolem 250 ° C až 300 ° C. Levoglukosan je dehet, který se dále štěpí na hořlavé plyny nebo alternativně repolymerizuje za vzniku char (zbytkový černý uhlíkový materiál). Nízké rychlosti ohřevu mají tendenci upřednostňovat tvorbu char. vedle převážně nehořlavých par, čímž uvolňují energii. Vysoké rychlosti ohřevu upřednostňují produkci levoglukosanu, čímž se získají hořlavé páry a malý nebo žádný popel, čímž se spotřebovává energie. (Bartlett, Hadden, & Bisby, 2019)

Lignin obvykle podléhá pyrolýze při teplotách uváděných jako 110 ° C až 400 ° C, 280 ° C až 500 ° C nebo 225 ° C až 450 ° C (Dietemberger & Hasburgh, 2016). Schaffer (Schaffer, 1973) zjistil, že lignin začal měknout kolem 160 ° C, poté následovalo opětovné vytvrzení ze 160 ° C na 210 ° C, přičemž pouze 10 % jeho úbytku hmotnosti nastalo při 280 ° C. Lignin produkuje aromatické produkty při pyrolýze a poskytuje více

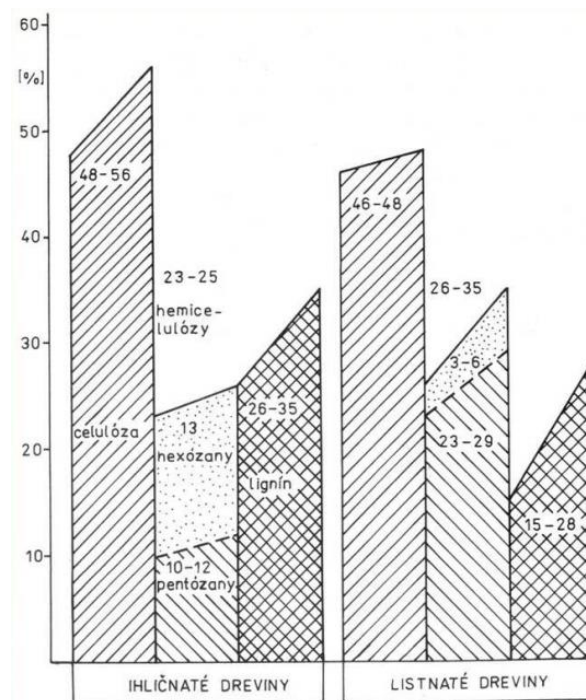
uhlí než celulóza – po zahřátí na 400 ° C až 450 ° C zůstává přibližně polovina ligninu jako uhlík, což významně přispívá k výtěžek char. Jelikož jehličnatá dřeva mají vyšší obsah ligninu než tvrdá dřeva, dávají proto vyšší výnosy char; to má dopad na rychlost hoření měkkého dřeva ve srovnání s tvrdým dřevem. (Bartlett, Hadden, & Bisby, 2019)

Při teplotách mezi 300 ° C a 500 ° C se rychlosti pyrolýzy rychle zvyšují a jsou doprovázeny dalšími exotermickými reakcemi, které způsobují rychlé zvyšování teplot, pokud není možné odvádět uvolněné teplo. Pyrolyzát nyní obsahuje hořlavé plyny, a proto k hořícímu vzplanutí obvykle dojde v době, kdy povrch dosáhne těchto teplot. Tyto plyny také nesou kapky vysoce hořlavých dehtů, které se jeví jako kouř; to upřednostňuje produkci levoglukosanu. Tento rychlý rozklad má za následek zbytkový char, který je méně snadno těkavý než panenské dřevo. (Bartlett, Hadden, & Bisby, 2019)

Tabulka 2 Chemické složení dřeva některých domácích dřevin

Komponent	Smrk	Borovice	Buk
Celulóza	45,6	43,2	39,2
Hemicelulóza	27,6	28	35,3
Lignin	26,9	26,6	20,9

Zdroj: (Blažej A., 1975)



Obrázek 5 Chemické složení dřeva

Zdroj: (Blažej A., 1975)

2.5.1 Teplota hoření

Uváděná teplota hoření je teplota, které lze dosáhnout hořením/vzplanutí dřeva za předpokladu optimálních podmínek. Obvykle teplota hoření dosahuje v praxi menší hodnoty, to díky teplotním ztrátám, ke kterým dochází při rozkladu CO_2 a H_2O a nedostatku potřebného vzduchu. Pro lepší představu v tabulce jsou uvedené příklady teploty plamene:

Tabulka 3: Teploty plamene

Nosič tepla	Teplota plamene ° C
Plynový hořák	1700-1975 ° C
Hořící zápalka	650-800 ° C
Svíčka	850-940 ° C
Cigareta	450-600 ° C
Acetylén	2200 až 3000° C

Zdroj: (Svatoň, 2000)

Díky rozdělení látek dochází k rozdělení teplot, jak v objemu, tak i ve výšce plamene. Teplota nedosahuje maxima v dolním úseku plamene, vzhledem k ohřevu a rozkladu oxidovadla (Svatoň, 2000).

ČSN 33 2312 ed. 2. je norma, která uvádí spojitost mezi stupni hořlavosti a třídami reakce na oheň. Stupeň hořlavosti není stejný jako třída reakce na oheň. Stupeň hořlavosti klasifikuje samostatně jednotlivé hmoty, zatím co třídy reakce na oheň klasifikují až finální podobu stavebního výrobku. V tabulce číslo dva jsou jednotlivé stupně a třídy reakce na oheň vidět (Kopos, Kolín a.s., 2020).

Tabulka 4: Třídy a reakce na oheň

Stupeň hořlavosti	Třída reakce na oheň	Popis
A	A1	Žádný příspěvek k rozvoji požáru, bez přeskočení ohně
	A2	nepodstatný příspěvek k rozvoji požáru, bez přeskočení ohně
B	B	velmi limitovaný příspěvek k rozvoji požáru, bez přeskočení ohně
C1	C	limitovaný příspěvek k přeskočení ohně, přeskočení ohně po 10 minutách od počátku požáru
C2	D	příspěvek k přeskočení ohně, přeskočení ohně mezi 2 a 10 minutami od počátku požáru
C3	E	značný příspěvek k přeskočení ohně, přeskočení ohně do 2 minut od počátku požáru
	F	nezkoušeno, případné nesplnění kritérií pro třídu E, přeskočení ohně nespecifikován

Zdroj: (Kopos, Kolín a.s., 2020)

2.5.2 Fáze hoření dřeva

Pokud bychom se zaměřili na rozdílnost hoření dřeva, lze pozorovat jisté diference v čase hoření. Podle toho rozlišujeme fáze hoření. Ihned po vzplanutí a v následujících několika minutách mluvíme o tzv. iniciaci, definované jako vznik hoření. Proces, který lze během tohoto krátkého časového úseku sledovat, je především devalvování hemicelulóz. Následuje fáze tzv. propagace, kdy je možné sledovat přeskočení a následné šíření plamene. V této fázi již mluvíme o plamenném hoření a dochází k zásadnímu rozkladu celulózy. Závěrečná fáze je pak determinace, kterou lze

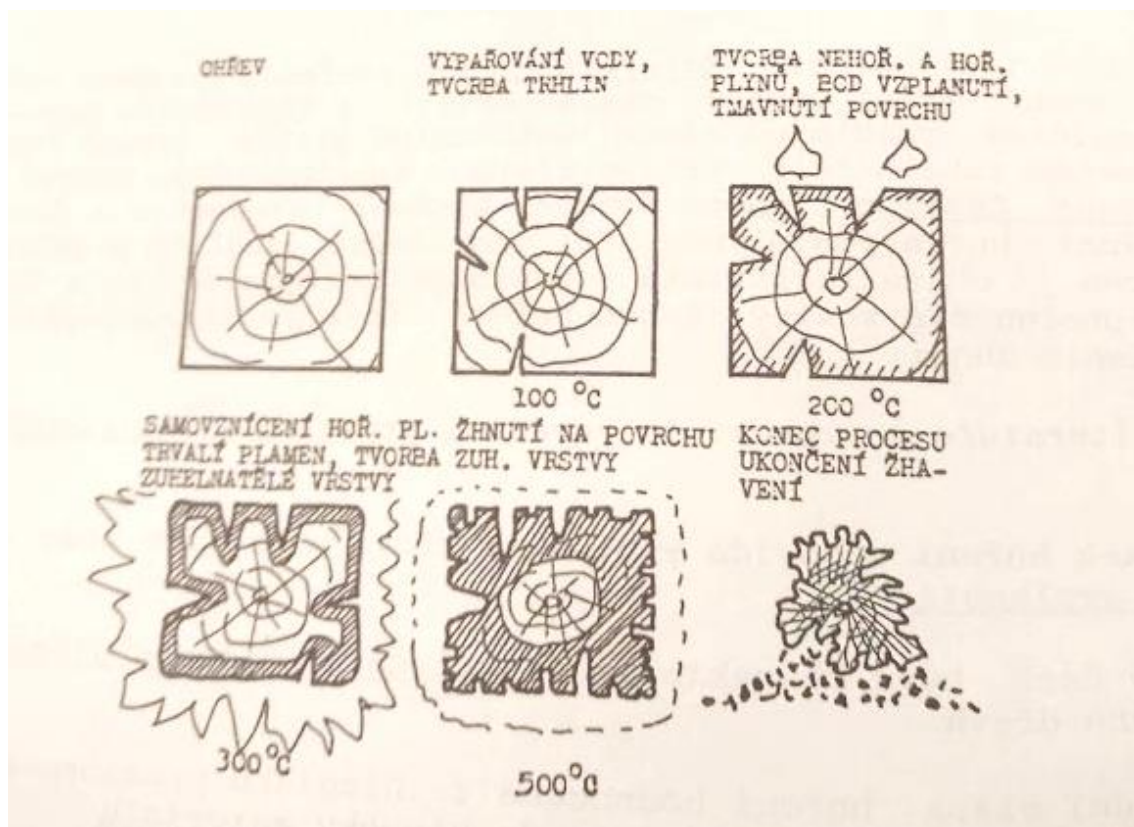
ještě také časově rozdělit. V první chvíli sledujeme rozšířené hoření, které působí rozkladově na všechny základní segmenty dřeva. Začíná se také tvořit zuhelnatělá vrstva dřeva. Finální úsek hoření je pak charakterizován vyhoření hořlavých plynů. V důsledku toho můžeme pozorovat zmírnění až zhasnutí plamene. V příhodných teplotních a vzdušných podmínkách pak sledujeme už pouze hoření uhlíkatého zbytku a žhnutí zuhelněné vrstvy. Když i tento děj vymizí, mluvíme o konci hoření dřeva (Svatoň, 2000).

2.5.3 Vizuální změny dřeva při hoření

Při hoření se na povrchu dřeva začínají tvořit trhliny, zvětšují povrchovou plochu a podmínky tepelné degradace do hloubky materiálu už při teplotě 110 °C. Barevný odstín dřeva se začíná měnit se zvyšující se teplotou. Dřevo se viditelně mění do tmavohnědých odstínů, tato změna nastává při teplotách přibližně 170–200 °C, s tím dochází i k významnému poklesu pevnosti dřeva. Od 300 °C a více se na povrchu dřeva začínají objevovat černá kostkovaně rozpraskaná struktura dřevěného uhlí. Zvětšují se podélné trhliny a výrazně unikají těkavé látky ze dřeva.

Chování při zuhelnatění, včetně smršťování a praskání vyvolané spalováním, může významně ovlivnit pyrolýzu materiálu, například praskliny zuhelnatění vyvolané praskáním se stanou důležitými cestami pro teplo přenášené do materiálu a pronikající plamen (Li, Zou, Bourbigot, Ji, & Chen, 2020).

Na konci procesu hoření dřeva zůstává popel obsahující převážně anorganické prvky např. Ca, K, Mg, Na. Popel je různorodý, záleží na stanovišti, kde strom rostl na jeho stáří, druhu dřeviny (Svatoň, 2000).



Obrázek 6: Vizuální změny dřeva při hoření

Zdroj: (Svatoň, 2000)

2.6 Stanovení hloubky zuhelnatění

Ve dřevě při hoření dřeva nastává proces zuhelnatění. Zuhelnatění má velký vliv na mechanické vlastnosti dřeva, dřevo začíná křehnout, pevnost dřeva není téměř žádná a dřevěný prvek nevydrží namáhání. Nepostradatelnou součástí posudku požární odolnosti je stanovení hloubky zuhelnatění. Pokud budeme chtít určit hloubku zuhelnatění, můžeme vzít v úvahu několik faktorů podle, kterých budeme posuzovat hloubku zuhelnatění. Faktory měření jsou podmíněné rychlostí zuhelnatění, způsobem ochrany prvku a časovým úsekem, který na dřevo působí (Fine civil engineering, 2021).

Dřevu, které je vystaveno ohni, stále roste vrstva zuhelnatění. Zároveň s delším časem v ohni se zvyšuje vrstva izolace, která snižuje rychlost hoření. Tento proces pokračuje do úplného spálení nebo do konce ohřevu (Barber, 2015).

Účinek požáru a jeho hloubka zuhelnatění se stanovuje z průřezu zuhelnatělého materiálu. Pokud chceme znát hloubku zuhelnatění, zjistíme ji měřením vzdálenosti čáry

zuhelnatění od vnějšího povrchu. Hloubku zuhelnatění ovlivňuje čas, po který je zkoumaný prvek vystaven hoření a rychlost zuhelnatění.

Dřevo, které bylo vystaveno požáru, je pokryto zuhelnatělou vrstvou neboli vrstvou dřevěného uhlí. Zuhelnatělá část dřeva vykazuje asi 17 % tepelné vodivosti rostlého dřeva, proto brání zvýšení teploty uprostřed průřezu na stejnou hodnotu, jako je na povrchu. Zuhelnatělá část tak slouží jako ochrana dřeva před ohněm, proto je oprávněný předpoklad, že požární odolnost dřevěných konstrukcí je o dost vyšší, než se všeobecné předpokládá. (Kuklík, 2010).

3 Termická modifikace dřeva

Výzkum tepelně upraveného dřeva je předmětem důležitých výzkumů již několik desetiletí. I když jsou účinky tepelného zpracování na trvanlivost dřeva známy již dlouho, jeho průmyslové využití je stále poměrně nové. V 70. letech vyvinula l'École des Mines de Saint-Etienne (Francie) průmyslový proces tepelného zpracování zvaný retifikace, který vede ke komercializaci retifikovaného dřeva v důsledku procesu NOW (New Option Wood). Výzkum provedený ve Finsku zároveň vedl k vývoji procesu Thermowood. Současně byly vyvinuty další technologie, jako je proces PLATO v Nizozemsku, proces Menz Holz OHT v Německu (Stingl et al. 2002; Boonstra et al. 2007). V posledních letech byly na trhu vyvinuty a komercializovány nové technologie, jako je tepelné zpracování dřeva v uzavřených tlakových podmínkách, jako je WTT a IWT (Molrup) v Dánsku, nebo tepelné zpracování dřeva ve vakuu, jako je Termovuoto v Itálii a Timura v Německu. Tepelné zpracování upravuje strukturu polymerů buněčných stěn dřeva prostřednictvím různých chemických reakcí, které materiálu dodávají nové vlastnosti. Tepelně ošetřené dřevo má nové vlastnosti, jako je lepší rozměrová stabilita a odolnost proti rozpadu, zatímco jeho pevnost se víceméně snižuje podle podmínek zpracování (Gérardin, 2016).

3.1 Termická úprava PLATO

PLATO patří mezi termické modifikace, které mají 4 fáze výroby. Každá fáze je jiná a obměňuje výši tlaku, teploty a čas trvání celé fáze. Druh dřeva tvar a tloušťka tyto faktory ovlivňují.

V prvním kroku přichází na řadu hydrotermolýza, která dřevo modifikuje pomocí páry nebo horkého vzduchu při tlaku 0,6 – 1 MPa a teplotě 150–190 ° C. V hydrotermolýze trvá celý krok 4 až 5 hodin.

V následujícím kroku přichází na řadu sušení. Sušení je důležitý proces, kde se dřevo musí dostat na požadovanou vlhkost mezi 8 až 10 %. Tento krok je časově nejdelší jeho doba se pohybuje okolo 3 až 5 dní.

Ve třetím kroku se na řadu dostává vytvrzování při tlaku 0,1 MPa a teplotě 150 až 190 ° C. Důležitým faktorem tohoto kroku je znepřístupnit pronikání vzduchu díky tomu se vlhkost dostává klidně i pod 1 %. Čas strávený u vytvrzování je 12 až 16 hodin.

Ve finálním kroku musíme dřevo navlhčit, aby dřevo dosáhlo na vlhkost 4 až 6 %. Tomuto finálnímu kroku se říká kondicionování a trvá po dobu tří dnů (Reinprecht, 2008).

3.2 Termická úprava olejem (OHT)

Tato metoda vychází z tepelné impregnace olejem. Rostlinný olej se musí nahřát v impregnačním kotli na 200 až 220 ° C, pak se nechá, aby olej prostoupil do středu dřeva, a tam si držel svoji teplotu mezi 180 a 200 ° C kolem 2 až 4 hodin. V posledním kroku tepelné modifikace OHT se dostává na řadu ochlazování dřeva, aby se dřevo mohlo rozměrově ustálit (Reinprecht, 2008).

3.3 Termická úprava Royal proces

Royal proces se dnes používá jen zřídka. Tato tepelná úprava se provádí za nižšího tlaku a při teplotách 60 až 90 ° C v impregnačním kotli s olejem. Z impregnačního kotle se na konci výrobní fáze olej odsaje pod vakuem (Reinprecht, 2008).

3.4 Termická úprava Retifikační proces

Než se zahájí výrobní proces musí se dřevo vysušit na vlhkost 12 %. Ve druhém kroku se dřevo dává do prostředí s dusíkem, kde se ohřívá na teplotu 210 až 260 ° C. Retifikační proces má výhodu, že si po tepelné úpravě dřevo nechává původní pevnost (Reinprecht, 2008).

3.5 ThermoWood ®

Tepelným zpracováním měníme vlastnosti dřeva na základě účelu použití. Odlišné teploty, doba zpracování a techniky sušení mají za následek různé výsledné vlastnosti. Tyto různé vlastnosti vedou k pozitivním změnám, jako k rozměrové a tvarové stálosti, tepelné vodivosti, odolnost proti hnilobě, dřevokazným škůdcům a flexibilitě dřeva při úpravě do různých tvarů a forem. Tento proces je ekologický bez použití jakýchkoliv chemických prostředků. Jedním ze způsobů tepelné úpravy dřeva je tzv. ThermoWood (termicky modifikované dřevo). Vyrábí se tepelným zpracováním při teplotách od 160 až 215 ° C, po kterém se mění fyzikální a vnitřní struktury dřeva.

Výrobní postup zahrnuje ohřátí dřeva na teploty vyšší než u jeho samovolného vznícení pomocí vodní páry. Vodní pára má v tomto postupu i ochrannou funkci (Prokom, R&S s.r.o., 2013).

3.5.1 Výrobní proces ThermoWood®

Samotný výrobní proces ThermoWoodu® může trvat až 36 hodin a lze jej rozdělit do tří hlavních fází. V první fázi probíhá vysokoteplotní sušení pomocí páry. Dřevo rychle zahřejeme na 100 ° C a následně je teplota pozvolně zahřívána až na 130 ° C. Vlhkost se během této fáze sníží téměř až na nulu. Doba sušení je závislá na počáteční vlhkosti dřeva, dřevině a tloušťce materiálu.

V druhé fázi dochází k samotnému tepelnému zpracování. Teplota je zvyšována na 185-215 ° C v závislosti na stupni tepelné úpravy (Thermo-S nebo Thermo-D).

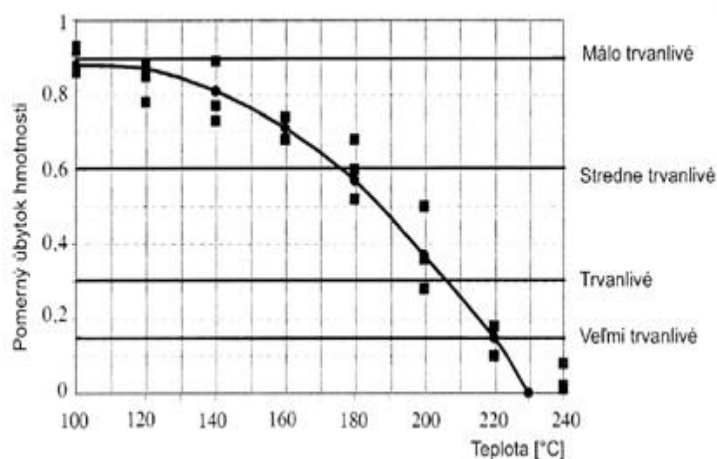
Při poslední třetí fázi se používá pára, jako ochrana při sušení a tepelném zpracování. Dřevo se postupem kontrolovaně ochlazuje, ale musí se dbát na pozvolné ochlazování. Při rychlém ochlazování by mohlo dojít k trhlinám dřeva. Po konečné úpravě by měla být konečná vlhkost dřeva okolo 5-7 %. V závislosti na stupni tepelného ošetření a řezivu trvá fáze konečné normalizace od 5 do 15 hodin. Pro dosažení správného ThermoWoodu je důležité dodržovat daný postup, aby tepelně modifikované dřevo mělo žádané vlastnosti (Prokom, R&S s.r.o., 2013).

3.6 Biologická odolnost

Biologická odolnost není stejná u každého tepelně modifikovaného dřeva záleží na postupu tepelné úpravy, druhu. Avšak ve většině případů platí všeobecné pravidlo, že s vyšším stupněm tepelné modifikace dřeva vzrůstá odolnost vůči houbám, hmyzu atd. Tepelnou úpravu dřeva lze úspěšně použít i pro málo trvanlivé nebo netrvanlivé dřevo (například lipové, vrbové, topolové). Dojde ke zlepšení jeho vlastností v takové míře, že je možné ho po termální modifikaci využít i na místech, kde by bylo jinak nutné použít pouze trvanlivé dřevo (Reinprecht, 2008).

3.7 Hygroskopicitá termodřeva

Právě hygroskopicitá u termálně upraveného dřeva je jednou z kladných vlastností. Díky ní má dřevo rozměrovou stabilitu. Další kladnou vlastností tepelné úpravy dřeva je dosažení jeho nízké hygroskopicity oproti rostlému dřevu. U termovaného dřeva upraveného procesem Retifikace nebo ThermoWood je 3–5 % rovnovážná vlhkost, když to u rostlého dřeva se pohybujeme okolo 10 - 12,5 % (Reinprecht, 2008).



Obrázek 7: Příklad zvyšování trvanlivosti ThermoWood dřeva z borovice při teplotě 100 až 240 °C

Zdroj: (Reinprecht, 2008)

3.8 Povětrnostní odolnost termodřeva

Termicky modifikované dřevo, které je vystaveno povětrnostním podmínkám jako dešti, emisím, UV zářením, kyslíku a dalším atmosférickým činitelům, to má za následek změnu barvy dřeva z hnědé do šedivé. Čím tmavší barva, tím rychlejší proměna. Může to být považováno za negativní vlastnost tepelné úpravy dřeva. Můžeme tomu zamezit nátěrem jiné bravy nebo olejem. Celkem dobrá odolnost proti trhlinám je prokázána, i když dřevo nenatřeme, je to díky zlepšené rozměrové stabilitě a nižší rovnovážné vlhkosti dřeva (Reinprecht, 2008).

Tepelně ošetřené dřevo orientálního buku vykazovalo také lepší stálost barev ve srovnání s neošetřenými vzorky po třech měsících přirozeného zvětrávání během zimy. Přirozené zvětrávání ovlivnilo tepelně upravené vzorky bukového dřeva méně než

neupravené vzorky, pokud jde o ztrátu lesku a drsnost povrchu. Vyšší teplota a doba tepelné modifikace rovněž přinesly lepší vlastnosti povrchu po přirozeném zvětrávání

Během pěti let expozice byl sledován výkon potaženého tepelně upraveného a nemodifikovaného smrkového a borového dřeva. Přestože bylo zjištěno, že obsah vlhkosti tepelně upraveného dřeva je ve srovnání s nemodifikovaným dřevem nižší, nebyl zjištěn žádný pokles povrchového růstu lakovaného dřeva. Použité tepelné ošetření nemělo vliv na růst plísní a modrých skvrn na natíraném dřevě v provozu (Jirouš-Rajkovič & Miklečic, 2018)

3.9 Pevnost termodřeva

U dřeva s tepelnou úpravou se snižuje hustota, a klesá pevnost v ohybu. Tvrdost se zvyšuje. Rovnovážná vlhkost je nižší, méně navlhla, bobtná a je rozměrově stálejší, odolnější povětrnostním vlivům. U varianty D (ThermoWood – D) se výše uvedené změny projevují více (Král, 2005).

Tepelné zpracování odhalilo jasný účinek na mechanické vlastnosti druhů měkkého dřeva. Pevnost v tahu rovnoběžně se zrnem vykazovala poměrně velký pokles, zatímco pevnost v tlaku rovnoběžně s vláknem se po tepelném zpracování zvýšila. Pevnost v ohybu, která je kombinací napětí v tahu, tlaku a smyku, byla po tepelném zpracování nižší. Tento pokles byl menší než pokles pouze pevnosti v tahu. Rázová pevnost vykazovala po tepelném zpracování poměrně velký pokles. Zvýšení modulu pružnosti během zkoušky ohybem bylo pozorováno po tepelném zpracování. (Boonstra, Acker, Tjeerdsma, & Kegel, 2007)

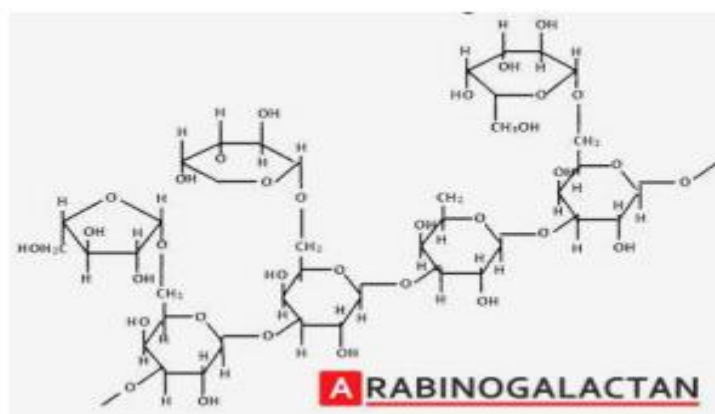
4 Retardéry hoření

Mezi hořlavé prvky patří materiály na bázi dřeva a samotné dřevo. Jak dřevo, tak i materiál na bázi dřeva mají různou odolnost proti požárům, ale téměř vždy je tato odolnost velmi malá. Proto se začaly používat retardéry hoření, které mají za úkol požár zabránit nebo ho zpomalit. Pokud na dřevo nebo na dřevěný materiál působí sálavé, anebo plamenné teplo s přítomností kyslíku, retardéry hoření neboli antipyriny mají za účel usměrnit různý přenosový a reakční průběh ve dřevě nebo v jiném hořlavém materiálu, a zabránit tak vzplanutí či vznětlivosti (Ramage, a další, 2017).

4.1 Přírodní retardér hoření Arbinogalaktan

Arbinogalaktany jsou hemicelulózy, které se hojně vyskytují v primárních a sekundárních buněčných stěnách rostlinných buněk. U většiny rostlin se arbinogalaktany vyskytují v kovalentní asociaci s proteinem, buď jako proteoglykany nebo glykoproteiny. Arbinogalaktan extrahovaný z jádrového dřeva modřínu. Je výjimkou, protože není vázán na bílkoviny, o čemž svědčí úplná absence dusíku (Gaff & kol., 2018).

Arbinogalaktan je dobře rozpustný ve vodě. Jedná se o dobré rozpouštědlo, je poměrně stabilní v širokém rozmezí pH a teploty. Je biologicky rozložitelný a má nízkou toxicitu (Makovická, 2017).



Obrázek 8: Arbinogalaktan

Zdroj: (Makovická, 2017)

4.2 Ochranné látky na snížení zápalnosti a hořlavosti dřeva

Retardéry hoření nezamezí zcela hořlavosti dřeva, avšak díky ochranným látkám můžeme účinně zpomalit a snížit zápalnost hoření. Ochrany ke snížení zápalnosti a hořlavosti dosáhneme několika způsoby:

- ochranný obal – ochranný obal kolem hořlavého materiálu, má za účel ho ochránit před vysokými teplotami a tím prodloužit čas, než dřevo začne vytvářet hořlavé plyny,
- zředování hořlavých látek – pokud jsme schopni v dostatečné míře naředit hořlavé plyny, dosáhneme jejich nezápalnosti,
- zabránění přístupu kyslíku ke dřevu při hoření,
- podporování tvorby zuhelnatění – při vhodném použití izolačních vrstev můžeme dosáhnout ztlumení procesu hoření,
- zamezení žhavení zuhelnatělé vrstvy – snaha odstranit potencionální zdroje, které by mohli podpořit hoření a eliminovat možnosti šíření požáru.
- účelným upravováním povrchu a spojů dřeva (Svatoň, 2000).

4.3 Fyzikální účinky retardérů hoření

Retardéry hoření s fyzikálními účinky působí tak, že regulují a zredukují hořlavé plyny, přenos hmoty a tepla (Reinprecht, 2008).

4.3.1 Omezení přenosu hmoty

Díky ulpění látek retardéru na venkovním nebo vnitřním povrchu dřeva vytvoří retardér těžko propustnou vrstvu, která zamezí nebo výrazně omezí přístup kyslíku do dřeva a hořlavých plynů ze dřeva. Vrstva na venkovním povrchu dřeva: je možné použít látky, ze kterých se stane takzvané vodní sklo, ale dnes převažuje použití hlavně pěnotvorných látek s vyšším bodem omezení přenosu tepla. Vrstva na vnitřním povrchu dřeva: látka která je mezi vrstvami lumenů a buněčné stěny. Právě mezi těmito vrstvy dokážeme vytvořit látky typu borytu, například kyselina boritá. Boryt v kapalně formě proniká hlouběji do dřeva. Díky tomu při teplotách pyrolýzy vytvoří glazuru. Ve zmíněných způsobech dochází k menšímu přenosu kyslíku v směru k dřevěné substanci a množství přenosu hořlavých plynů ze dřeva ven. (Reinprecht, 2008).

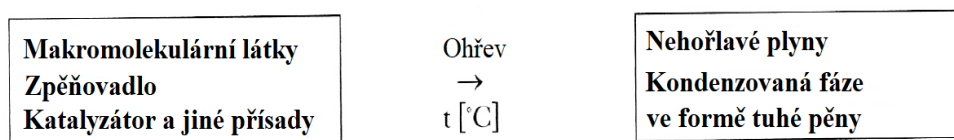
4.3.2 Omezení přenosu tepla

Hořlavost je důležitým faktorem při výběru materiálu. Přísné testy kontrolují šíření plamene, příspěvek paliva, a rychlosti vývoje kouře, aby se odpovídajícím způsobem klasifikovala hořlavost izolátorů. Například směs chemikálií zpomalujících hoření a celulózy (inherentně hořlavý materiál) snižuje schopnost šíření požáru. Přidání retardérů hoření však snižuje tepelný odpor izolátoru, čímž se snižuje jeho výkon. Poměr přínosů k nákladům je dalším důležitým faktorem, který je obecně zvažován při výběru izolace. (Sadineni, Madala, & Boehm, 2011)

Omezení přenosu tepla dosáhneme tak, že obalíme vnější povrch dřeva do tepelně-izolačních vrstev. Tím zamezíme přívod tepelného zdroje směrem ke dřevu. (Reinprecht, 2008).

Tuhé pěnové tepelně-izolační vrstvy se mohou natírat nebo se nalepuje folie. Tato vrstva chrání dřevěný materiál. Jeho ochrana spočívá ve vytvoření pevné tepelně – izolační, mikroporézní vrstvy, která může až 30 minut odolávat ohni nebo sálavému teplu. Tato odolná vrstva se vytvoří reakcí teploty nad 150 ° C. Takzvané intumescentní nátěry neboli zpěňovače jsou velmi používané při požární ochraně. Nanesení zpěňovací látky se většinou dělá v tenkých vrstvách a aplikuje se výhradně ve vodní disperzi. Tato vrstva se za přispění tepla mění v tuhou pěnu, která brání prostupu kyslíku, hořlavých plynů, tak i tepla. Doporučuje se minimální nátěr o hmotnosti 300 až 500 g na m² což by mělo stačit na tuhou vrstvu pěny o síle 5 mm, aby byl dosažen správný účinek. Před nátěrem zpěňujících látek je možné použít i jiné nátěry, nebo se dají přimíchat do zpěňujících nátěrů, avšak tento nátěr musí být poslední (Reinprecht, 2008).

Proces změny intumescentních nátěrů za pomoci tepla:



Obrázek 9: Proces změny intumescentních nátěrů za pomoci dřeva

Zdroj: (Reinprecht, 2008)

Makro molekulové látky – které se používají do intumescentních nátěrů jsou například různé polyalkoholy, polyvinylacetáty, a jejich kopolymery, polyamidy, polyuretany, polyaminofosfáty atd...

Zpěňovadla – jsou látky vytvářející nehořlavé plyny při teplotách nad 150 ° C za přispění katalyzátorů. Nehořlavé látky naředí hořlavé látky vycházející ze dřeva a napěňuje se makromolekulová složka.

Katalyzátory – jsou součástí všech přeměn od tenké vrstvy na pevnou pěnu. Začíná to rozkladem zpěňovadel na nehořlavé plyny, dále pokračuje napěněním makromolekulárních látek. Některé katalyzátory jako soli kyseliny fosforečné mohou zvýšit odolnost vytvořené tuhé pěny případně i dřeva.

Přísady – zajišťují stabilitu přilnavost, správnou barvu, zvyšují pevnost tuhé pěny a přispívají k odolnosti vůči povětrnostním podmínkám a biologickým škůdcům.

Řazení hořlavých plynů – v důsledku hoření dochází k produkci hořlavých plynů, které se smísí s kyslíkem a podporují hoření v aktivní zóně pyrolýzy. Nehořlavé plyny z ošetřeného dřeva retardéry by se měli uvolňovat ve správnou dobu, aby snížili pravděpodobnost promísení hořlavých plynů a reakcí s kyslíkem. Díky menší míře promísení látek se reakční teplo neuvolní do takové míry, jak by mohlo (Reinprecht, 2008).

4.3.3 Zredukování hořlavých plynů

Obecně platí, že při hoření dřeva, dochází k produkci hořlavých plynů, kterým se jejich hořlavost sníží při setkání s nehořlavými plyny jako je pára, oxid uhličitý nebo amoniak. Pokud se nehořlavé plyny dostanou na povrch dřeva, k činné oblasti pyrolýzy, produkce reakčního tepla klesá a v tu chvíli požár ztrácí na své síle (Reinprecht, 2008).

4.4 Chemické ochranné prostředky na dřevo proti ohni

Zpomalovače hoření zahrnují rozmanitou skupinu chemikálií, které se široce používají v relativně vysokých koncentracích v mnoha aplikacích, včetně výroby elektronických zařízení, textilií, dřevěných staveb nebo dřevěných prvků, polymerů z plastů a v automobilovém průmyslu. Roční spotřeba retardérů hoření je v současné době více než 1,5 milionu tun. Retardér hoření se používají především k ochraně materiálů proti vznícení a prevenci škod způsobených ohněm. Testy spalování srovnávající výsledky při použití zpomalovače hoření a bez zpomalovačů hoření prováděné Národním úřadem pro normy (The National Institute of Standards and Technology) ukázaly, že

materiály s retardérem hoření umožňují delší dobu úniku, menší uvolňování tepla, méně kouře a uvolňování nižší koncentrace toxických plynů. Tyto účinky jsou způsobeny snížením množství hořících materiálů. (Segov, Kushmaro, & Brenner, 2009)

Jako chemické retardéry hoření se používají vodní roztoky anorganických a organických sloučenin. Látky se mezi sebou kombinují tak, aby se dosáhlo co největší efektivity. Každá látka má jiné ochranné účinky. Spojením různých látek vznikne sice retardér hoření, ale mohou se projevit i některé nechtěné vedlejší vlastnosti. Vedlejší vlastnosti se vylepšují pomocí pomocných látek, složení těchto látek bývá tajemstvím výrobce. (Svatoň, 2000).

Existuje více než 175 různých typů retardérů hoření, běžně rozdělených do čtyř hlavních skupin: anorganické retardéry hoření, retardéry hoření s organickým fosforem, retardéry hoření s obsahem dusíku a halogenované organické retardéry hoření. Anorganické retardéry hoření zahrnují hydroxidy kovů (např. hydroxid hlinitý a hydroxid hořečnatý), polyfosforečnan amonný, soli boru, anorganické sloučeniny antimonu, cínu, zinku a molybdenu, stejně jako elementární červený fosfor. Anorganické retardéry hoření se přidávají jako plniva do polymerů a jsou považovány za nepohyblivé, na rozdíl od organických přísad retardéru hoření. Organo-fosforové retardéry hoření jsou primárně fosfátové estery, které mohou také obsahovat brom nebo chlor. Organo-fosforové retardéry hoření jsou široce používány jak v polymerech, tak v textilních celulózových vláknech. Retardéry hoření obsahující dusík inhibují tvorbu hořlavých plynů a používají se především v polymerech obsahujících dusík, jako je polyuretan a polyamid. Nejdůležitější retardér hoření na bázi dusíku jsou melamin a deriváty melaminu. Halogenované organické retardéry hoření jsou obvykle na bázi chloru a bromu (Segov, Kushmaro, & Brenner, 2009)

4.5 Způsoby aplikace retardérů hoření

Nejčastější formou impregnační ochrany dřeva vůči ohni je kapalná forma. V případě použití retardérů hoření se obvykle používají dvě metody, buď povrchová úprava nebo hloubková impregnace dřeva (Reinprecht, 2008).

Zpomalovače hoření jsou obvykle buď potaženy na povrch dřeva, nebo impregnovány do struktury dřeva pomocí vakuově-tlakové techniky, i když jsou zkoumány další technologie, jako je plazmové zpracování (Pabelina, Lumban, & Ramos, 2012).

Při impregnaci je struktura dřeva považována za podobnou struktuře houby s buněčnými dutinami a buněčnými stěnami. Cílem zpomalení hoření je opláštění těchto stěn zpomalovačem hoření, který chrání konstrukci před ohněm. Nejprve vakuum odstraní vzduch z dutin a vytvoří prostor pro impregnaci, která se pak pod vysokým tlakem vtlačí hluboko do dřeva. Proces lze opakovat a parametry upravit tak, aby se optimalizovalo ošetření v závislosti na úrovni ochrany a požadovaném hloubkovém profilu retardéru hoření ve dřevě. (Lowden & Hull, 2013)

Zvolený způsob aplikace se většinou volí podle způsobu použití, do interiéru nebo do exteriéru. Pokud se rozhodneme použít dřevo na venkovní účely, je lepší nechat impregnovat do hloubky, tak bude mít větší ochranu před atmosférickými podmínkami. Při použití ve vnitřním prostoru by nám měla stačit povrchová impregnace (Horský, 1987).

4.6 Retardér hoření a jeho povrchové úprava

Aplikace povrchové ochrany se obvykle provádí nátěrem, nástřikem nebo ponořením do roztoku retardéru hoření. Povrchová ošetření, jako jsou barvy, jsou často považována za atraktivní pro snadnost jejich aplikace a pro relativně malé množství materiálu potřebného pro požární ochranu. Související požadavky na opětovné použití a možnosti poškození povrchu jsou však pro koncového uživatele značné problémy. (Lowden & Hull, 2013)

Důležité u této metody je zachovat stejně nános po celém povrchu, aby se nestalo, že bude impregnovaná jen část povrchu, jinak by nátěr nefungoval správně. Pokud se zaměříme na správný postup při aplikaci nátěru pomocí stříkání, jsou určitá pravidla, na která je třeba dávat pozor. Trysky musí být v správné vzdálenosti od impregnovaného povrchu dřeva po celou dobu impregnace. Velkým kladem tohoto postupu je jeho rychlost a impregnace do špatně přístupných prostor, kam by se látka jen velmi špatně dostávala pomocí nátěru. Používá se hlavně u konstrukcí (Horský, 1987).

Pokud nechceme použít nátěr nebo nástřik, dá se použít krátký ponor nebo máčení. Po ponoru či máčení je důležité si zkontrolovat povrch, zda se na povrchu nevytvořily bublinky. U všech zmíněných lze impregnaci použít ve více vrstvách. Ponor a máčení je téměř stejný, jejich odlišnost je pouze v době impregnace, ponor trvá pár vteřin až minut a máčení je až od patnácté minuty (Reinprecht, 2008).

4.7 Hloubková impregnace retardéru hoření

Tato metoda je náročnější na aplikaci je pro ni potřeba tlaková impregnační komora. Do dřeva díky tlaku 0,8 MPa nebo vakuu 0,1 MPa či kombinací obou metod se dostane impregnace až do hloubky dřeva, tato hloubka bývá vysoká, a tudíž odolnost je vyšší. Musíme si říci, že na dosažené hloubce v dřevině je závislá i na dřevině, v téměř každé je účinek hloubkové impregnace celkový, ale najdou se dřeviny, u kterých se to zcela nepodaří (Holan, 2006).

Hloubkový způsob impregnace nelze použít ve všech případech, ve vodním skle jsou kousky, které se nedostanou do dřeva. Povrchová impregnace není tak efektivní jako hloubková impregnace, její odolnost je jednoznačně vyšší. V případě lepených dřevěných materiálů, lze retardér hoření přimíchat do spojovacích látek, a jejich dopad bude obdobný jako u hluboké impregnace. Avšak je třeba správně vybrat směs lepidla s hloubkovou impregnací, aby nedošlo k nechtěné odezvě a tím znehodnocení výrobku (Horský, 1987).

4.8 Metody hodnocení hořlavosti dřeva

4.8.1 Hodnocení protipožární odolnosti dřeva

Hodnocení protipožární odolnosti dřeva spočívá ve vytvoření věrohodných podmínek požáru, následně se zkoumá, jak se jednotlivé materiály chovají. Zkouška musí být provedena velmi precizně, aby výsledek byl co nejpřesnější.

Ve vývoji hodnocení se dělají pokroky a zkoušky jsou stále efektivnější a přesnější. Momentálně se řídíme podle evropských norem, tak aby byly tyto zkoušky jednotné v rámci Evropy. Zkoušky mají jasná pravidla, a také jejich výsledky jsou přesnější (Osvald, a další, 2009).

Evropské normy stanovují kvalitu a způsob posuzování reakce stavebních materiálů na oheň pro všechny země v evropské unii. Způsob testů se vztahuje na dvě skupiny stavební výrobky kromě podlahových krytin a podlahové krytiny. Zkouší a hodnotí požární charakteristiky výrobků a stavebních prvků podle normy ČSN EN 13501-1 se používají tyto zkušební metody:

-
- zkouška nehořlavosti ČSN EN ISO 1182. V této zkoušce se určují výrobky a stavební prvky, které významně nepřispívají k požáru bez ohledu na jejich konečné použití. Zkouška je určena pro třídy A1, A2, A1fi, A2fi,
 - zkouška spalného tepla ČSN EN ISO 1716. Zjišťuje se nejvyšší možná hodnota celkového uvolněného tepla při úplném spálení výrobku, bez ohledu na jeho konečné použití. Zkouška je určena pro třídy A1, A2, A1fi, A2fi,
 - zkouška jednotlivého hořícího předmětu ČSN EN 13823. Touto zkouškou se zjišťuje možný vliv na výrobky na rozvoj požáru při simulaci požáru osaměle hořícího předmětu v rohu místnosti blízko zkouškového výrobku. Zkouška je určena pro třídy A2, B, C, D,
 - zkouška zápalnosti ČSN EN ISO 11925-2. Tato zkouška podává informace o zapalitelnosti výrobku při vystavení účinkům malého plamene. Zkouška je určena pro třídy B, C, D, E, Bfi, Cfi, Dfi, Efi, (2.5.1)
 - zjišťování chování podlahových krytin při hoření s použitím sálavého zdroje tepla ČSN EN ISO 9239-1. Zjišťuje se kritický sálavý tok, při kterém se plameny přestanou šířit po vodorovném povrchu. Zkouška je určena pro třídy A2fi, Bfi, Cfi, Dfi (Osvald, a další, 2009)

Tabulka 5: Reakce na oheň podlahových krytin

Třída	Zkušební metoda	Klasifikační kritéria	Doplňková klasifikace
A1	ČSN EN ISO 1182 ⁽¹⁾	$\Delta T \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$	-
		$\Delta T \leq 50 \text{ } \%$	
		$t_f = 0$	
	ČSN EN ISO 1716	$PSC \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1(1)}$	-
$PSC \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1(2, 2a)}$			
$PSC \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-2(3)}$			
$PSC \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1(4)}$			
A2	ČSN EN ISO 1182 ⁽¹⁾	$\Delta T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$	-
		$\Delta m \leq 50 \text{ } \%$	
		$t_f = 20 \text{ s}$	
	ČSN EN ISO 1716	$PSC \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1(1)}$	-
		$PSC \leq 4,0 \text{ MJ.kg}^{-1(2)}$	
		$PSC \leq 4,0 \text{ MJ.kg}^{-1(3)}$	
		$PSC \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1(4)}$	
ČSN EN 13823	$FIGRA \leq 120 \text{ W.s}^{-1}$	Tvorba dýmu ⁽⁵⁾ Hořící kapky/částice ⁽⁶⁾	
	LVS <okraj vzorku		
	$THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$		
B	ČSN EN 13823	$FIGRA \leq 120 \text{ W.s}^{-1}$	Tvorba dýmu ⁽⁵⁾ Hořící kapky/částice ⁽⁶⁾
		LVS <okraj vzorku	
		$THR_{600s} \leq 7,5 \text{ MJ}$	
ČSN EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Expozice = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm za } 60 \text{ s}$		
C	ČSN EN 13823	$FIGRA \leq 250 \text{ W.s}^{-1}$	Tvorba dýmu ⁽⁵⁾ Hořící kapky/částice ⁽⁶⁾
		LVS <okraj vzorku	
		$THR_{600s} \leq 15 \text{ MJ}$	
ČSN EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Expozice = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm za } 60 \text{ s}$		
D	ČSN EN 13823	$FIGRA \leq 750 \text{ W.s}^{-1}$	Tvorba dýmu ⁽⁵⁾ Hořící kapky/částice ⁽⁶⁾
	ČSN EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Expozice = 30 s	$F_s \leq 150 \text{ mm za } 60 \text{ s}$	
E	ČSN EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm za } 20 \text{ s}$	Hořící kapky/částice ⁽⁶⁾
F	bez definice		

Zdroj: (Osvald, a další, 2009)

Tabulka 6: Reakce na oheň podlahových krytin

Třída	Zkušební metoda	Klasifikační kritéria	Doplňková klasifikace
A1 _{fi}	ČSN EN ISO 1182 ⁽¹⁾	$\Delta T \leq 30 \text{ }^\circ\text{C}$	-
		$\Delta T \leq 50 \text{ } \%$	
		$t_f = 0$	
	ČSN EN ISO 1716	$\text{PSC} \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1(1)}$	-
$\text{PSC} \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1(2, 2a)}$			
$\text{PSC} \leq 1,4 \text{ MJ.kg}^{-2(3)}$			
$\text{PSC} \leq 2,0 \text{ MJ.kg}^{-1(4)}$			
A2 _{fi}	ČSN EN ISO 1182 ⁽¹⁾	$\Delta T \leq 50 \text{ }^\circ\text{C}$	-
		$\Delta m \leq 50 \text{ } \%$	
		$t_f = 20 \text{ s}$	
	ČSN EN ISO 1716	$\text{PSC} \leq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1(1)}$	-
$\text{PSC} \leq 4,0 \text{ MJ.kg}^{-1(2)}$			
$\text{PSC} \leq 4,0 \text{ MJ.kg}^{-1(3)}$			
$\text{PSC} \geq 3,0 \text{ MJ.kg}^{-1(4)}$			
	ČSN EN 9239-1 ⁽⁹⁾	Kritický tok ⁽¹⁰⁾ $\geq 8,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Tvorba dýmu ⁽¹¹⁾
B _{fi}	ČSN EN 9239-1 ⁽⁹⁾	Kritický tok ⁽¹⁰⁾ $\geq 8,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Tvorba dýmu ⁽¹¹⁾
	ČSN EN ISO 11925-2 ⁽¹²⁾ Expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm za } 20 \text{ s}$	
C _{fi}	ČSN EN 9239-1 ⁽⁹⁾	Kritický tok ⁽¹⁰⁾ $\geq 4,5 \text{ kW.m}^{-2}$	Tvorba dýmu ⁽¹¹⁾
	ČSN EN ISO 11925-2 ⁽¹²⁾ Expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm za } 20 \text{ s}$	
D _{fi}	ČSN EN 9239-1 ⁽⁹⁾	Kritický tok ⁽¹⁰⁾ $\geq 3,0 \text{ kW.m}^{-2}$	Tvorba dýmu ⁽¹¹⁾
	ČSN EN ISO 11925-2 ⁽¹²⁾ Expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm za } 20 \text{ s}$	
E _{fi}	ČSN EN ISO 11925-2 ⁽¹²⁾ Expozice = 15 s	$F_s \leq 150 \text{ mm za } 20 \text{ s}$	
F _{fi}	bez definice		

Zdroj: (Osvald, a další, 2009)

- (1) pro homogenní prvky a významné prvky nehomogenních výrobků,
- (2) pro každý vnější nevýznamný prvek nehomogenních výrobků,

-
- (2a) pro každý vnější prvek mající PSC $2,0 \text{ MJ.m}^{-2}$, za předpokladu, že výrobek splňuje následující kritéria ČSN EN 13823: $\text{FIGRA} \leq 20 \text{ W.s-1}$ a LFS okraj zkušební vzorku a $\text{THR600s} \leq 4,5 \text{ MJ}$ a s_1 a d_0 ,
 - (3) pro každý vnitřní nevýznamný prvek nehomogenních materiálů,
 - (4) pro výrobek jako celek,
 - (5) v poslední fázi výroby se zavedli změny systému měření dýmu, jejichž účinek si vyžaduje další zkoumání. Zjišťování hraničních hodnot a parametrů tvorby dýmu se mohou podle toho změnit. $s_1 = \text{SMOGRA} \leq 30 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ a $\text{TPS600s} = \leq 50 \text{ m}^2$. $s_2 = \text{SMOGRA} \leq 180 \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$ a $\text{TPS600s} = \leq 200 \text{ m}^2$. $s_3 =$ nesplňuje s_1 nebo s_2 ,
 - (6) d_0 =žádné hořící kapky/částice při zkoušce podle ČSN EN 13823 v čase 600 s
 d_1 =žádné hořící kapky/částice trvající déle než 10 s podle ČSN EN 13823 v čase 600 s, d_2 =nesplňuje d_0 nebo d_1 ,
 - (7) vyhovuje=bez zapálení papíru (bez klasifikace). Nevhovuje=zapálení papíru (klasifikace d_2),
 - (8) v podmínkách vystavení povrchu vzorku plamenu a v případě vhodnosti, z hlediska konečného užívání i vystavení hrany vzorku plamenu,
 - (9) délka zkoušky 30 min,
 - (10) kritický tok je určený jako tok sálavého tepla, při kterém plamen zhasne, anebo tok sálavého tepla po 30 minutách zkoušky podle toho, který z nich je nižší (to je tok zodpovídající největšímu rozšíření plamene), $s_1 = \text{dym} \leq 750 \text{ \% minut}$,
 - (11) s_2 =nesplní s_1 ,
 - (12) v podmínkách vystavení povrchu vzorku plamenu a v případě vhodnosti z hlediska konečného používání i vystavení hrany vzorku plamenu (Osvald, a další, 2009).

5 Metodika

Na základě cíle bakalářské práce rozdělujeme do bodů:

- analýza literárních pramenů,
- příprava zkušebních vzorků,
- značení zkušebních vzorků,
- vážení zkušebních vzorků,
- impregnace zkušebních vzorků,
- měření na kónickém kalorimetru,
- chemické analýzy,
- vyhodnocení,
- výsledky,
- diskuse.

6 Metodika experimentální práce

6.1 Příprava zkušebních vzorků

Na začátku jsme vybrali dřevinu, kterou budeme testovat, vybrali jsme akát. Dřevo z akátu jsme nařezali na stejné rozměry 100 x 100 x 20 mm. Každý vzorek jsme změřili a zaznamenali do tabulky. Pro test jsme potřebovali 60 vzorků z toho 20 vzorků bez retardérů jen tepelně modifikovaných, 20 vzorků s přírodním retardérem hoření a tepelnou modifikací a posledních 20 vzorků se syntetickým retardérem a tepelnou modifikací. Hustotu jsme stanovili dle normy ISO 13061-2 před i po termické modifikaci, na základě naměřených dat jsme data zapsali do následné tabulky.

6.1.1 Tepelná modifikace

Před zkouškou se vzorky kondicionují na konstantní hmotnost při teplotě (23 ± 2 g) C a relativní vlhkosti 8 % v souladu s ISO 554. Konstantní hmotnost se považuje za dosaženou, když se dvě po sobě jdoucí vážení prováděná při intervalu 24 hodin neliší o více než 0,1 % hmotnosti zkušebního kusu nebo 0,1 g. podle toho, co je větší.

Poté jsme dřevo tepelně modifikovali pomocí metody TermoWood®. Vybrali jsme 3 různé teploty, a to 160, 180, a 210 ° C, na které jsme vzorky tepelně upravovali. Metoda TermoWood® má 3 fáze, ohřívání, tepelnou modifikaci a chlazení.

Tabulka 7 Termická modifikace

Akát	Hodin	Teplota	Hodin	Teplota	Hodin	Teplota
Ohřívání	9,9	0-160	13,1	0-180	15,5	0-210
Tepelná modifikace	3	160	3	180	3	210
Chlazení	5,8	160-50	10,5	180-50	11	210-20
Celkový čas	18,7		26,6		29,5	

Zdroj: (Vlastní)

6.2 Značení zkušebních vzorků

Aby bylo možné jednotlivé vzorky rozlišit, museli jsme je pečlivě označit. Použili jsme označení, které určovalo druh dřeva, teplotu tepelné modifikace, druh použitého retardéru a pořadí vzorku v hodnocené skupině.

Použité značky: (viz příklad níže)

AK.... akátové dřevo

20,160, 180, 210 tepelná modifikace

Aarabinogalaktan (přírodní retardér)

Fflamgard (syntetický retardér)

Wbez retardéru hoření

Příklad kódu označující vzorek AK/160/A/1. Tento kód označuje druh dřeva v mém případě akát (AK). Číslo 160 nám určuje tepelnou modifikaci daného vzorku. Písmeno A nám říká, jakým retardérem hoření je vzorek ošetřen v daném kódu znamená arabinogalaktan nebylo přírodní retardér hoření. Jako poslední část kódu je opět číslo, a to číslo 1, které určuje číslo vzorku.

6.3 Vážení zkušebních vzorků

Během experimentální části jsme sledovali změny hmotnosti vzorků v jednotlivých fázích procesu. Nejdříve jsme vážili vzorky před a po tepelné modifikaci. Poté jsme vzorky vážili před a po úpravě retardéry hoření. Na závěr jsme vzorky vážili při měření na kónickém kalorimetru, kdy jsme celý proces snímali (zaznamenávali) na váze kónického kalorimetru.



Obrázek 10 Váha na kónickém kalorimetru

Zdroj: (Vlastní)

6.4 Úprava zkušebních vzorků

Pro porovnání jsme vybrali dva retardéry hoření: syntetický retardér hoření Flamgard a přírodní retardér hoření Arabinogalaktan. Vzorky jsme upravili pomocí techniky máčení, při koncentraci roztoku 50 % retardéru a 50 % vody. Pro tento poměr roztoku jsme se rozhodli, z důvodu předběžných dřívějších experimentálních výsledků na katedře zpracování dřeva a bio materiálů, které vykazovali dobré výsledky. Po aplikaci retardéru jsme vzorky sušili a až po 24 hodinách jsme přešli k měření na kónickém kalorimetru.



Obrázek 11 Úprava vzorku Arabinogalaktanem a Flamgardem

Zdroj: (Vlastní)

6.5 Měření na kónickém kalorimetru

6.5.1 Kalibrace

Vzorky jsme kalibrovali podle normy ISO 5660-1:2015. Kalibrace jsme provedli před měřením vzorků. Přístroj jsme zapnuli, spustilo se ohřívání zářiče a zároveň jsme spustili chlazení. Počkali jsme, než kalorimetr dosáhne požadované hodnoty teplotního zářiče. Nejprve jsme provedli kalibraci rychlosti uvolňování tepla, pak jsme určili

konstantní clonu C. Pomocí kalibrovaného průtokoměru jsme do kalibračního hořáku pustili metan. Nechali jsme ho hořet konstantní rychlosti po dobu 3 minut, pak jsme zaznamenávali měřená data po 5 sekundách po dobu 3 minut. Dále jsme kalibrovali zářič bez použití vzorku a držáku, tak aby produkoval ozáření $25 \text{ kW/m}^2 \pm 2 \%$, které jsme měřili měřičem tepelného toku. Po dobu 10 minut jsme zářič ohřívali a udržovali jeho stabilní hodnotu. Dále jsme kalibrovali množství O_2 na hodnotu 20,95 % po dobu 30 sekund. Následovala kalibrace hmotnosti pomocí závaží umístěného na držáku. Pokud všechny tyto kalibrační zkoušky jsou schváleny (odpovídají požadovaným hodnotám v rámci kalibračních odchylek), můžeme přistoupit k samotnému měření vzorků.

ISO 9001	Kalibrace	Kontak
Kalibrace při změně HW		
Kalibrace odezvy hořáku	26.09.2019	Načíst q(A,180) odpočet: 180 s 107,5
Kalibrace odezvy váhy	26.09.2019	Vynulovat váhu Přidat závaží Odebrat závaží 1 1 průměr 1 OK xxx OK
Kalibrace posunutí váhy	26.09.2019	Vynulovat váhu Závaží přidáno - vážit odpočet: 1800 s -58,23 OK xxx OK
Kalibrace analyzátoru kyslíku vše	OK	N2 měřit Měřit O2 (20,95 %) odpočet: 30 s 26,09 20,251 Aktuální: 20,95 OK xxx 20,95
Prodleva a odezva analyzátoru O2	27.09.2019	Měřit td, tr odpočet: 180 s 10 10 10 11 10 11 td 10,3 OK xxx OK
Šum a posunutí analyzátoru O2	27.09.2019	Měřit rms odpočet: 180 s 10 8 10 8 10 8 tr 9,0 OK xxx OK
Denní kalibrace		
Kalibrace přesnosti váhy	14.12.2020	Vynulovat vzorky 1-4 [g]: 964,8 964,0 964,8 964,8 Vážit 964,8 964,8 964,8 964,8 dif < 0,3 g OK
Kalibrace analyzátoru kyslíku	14.12.2020	Nastavit O2 (20,95 %) odpočet: 30 s 20,95 dif <= 0,01 % OK
Kalibrace uvolňování tepla	14.12.2020	průtok metanu kW: 5 Zjistit konstantu C odpočet: 180 s -0,009 OK
Kalibrace zářiče	14.12.2020	požadovaný kW/m2: 49,0 Měřit zářivý tok odpočet: 471 s 51,3 dif <= 2 % chybné

Obrázek 12 Fotka záznamu kalibrace

Zdroj: (Vlastní)

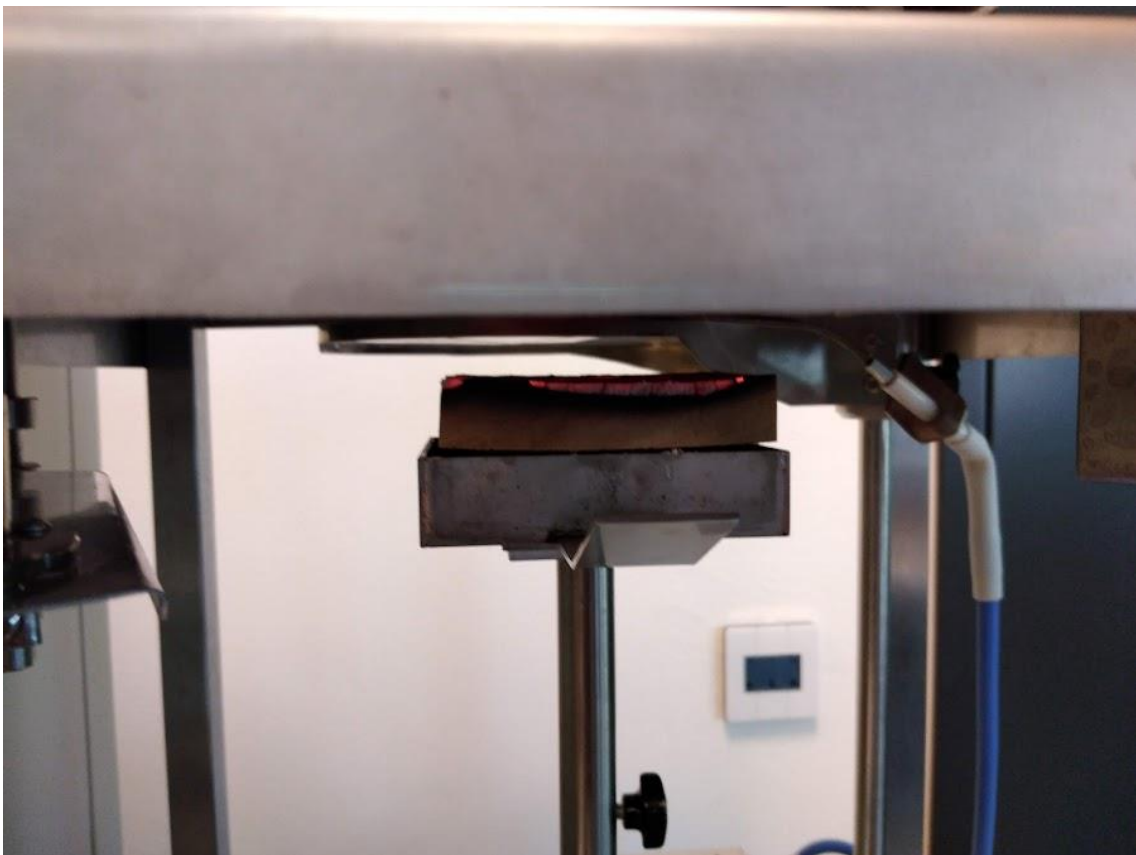


Obrázek 13 Kónický kalorimetr

Zdroj: (Vlastní)

6.5.2 Měření na kónickém kalorimetru

Po kalibraci kalorimetru jsme přistoupili k měření vzorků. Důraz jsme kladli na bezpečnost práce, při práci se používali ochranné prostředky, například rukavice odolné vůči vysoké teplotě, aby nedošlo k popálení při vkládání a vyjímání vzorku do držáku. Před začátkem samotného testu vzorků jsme do programu vložili potřebná data, jako jsou rozměry daného vzorku, název vzorku, hmotnost vzorku, tlak. Test jsme zahájili měřením vzorku. Po minutě od zahájení měření jsme iniciovali trvalý plamen. Každá vzorek jsme testovali po dobu 30 minut. Kónický kalorimetr průběžně generoval naměřené hodnoty.



Obrázek 14 Měření na kónické kalorimetru

Zdroj: (Vlastní)

6.5.3 Sledované parametry na charakteristiky hoření

Pro tento test jsme zvolili 10 parametrů na charakteristiku hoření, které jsme sledovali:

- maximální hodnotu uvolňování tepla na jednotku plochy,
- čas k dosažení maximální rychlosti hoření,

-
- celkové teplo,
 - hmotnost při dosažení trvalého plamene,
 - hmotnost po ukončení testu,
 - úbytek hmotnosti,
 - rychlost úbytku hmotnosti,
 - rychlost úbytku hmotnosti hoření 10–90 %,
 - MERHE maximální průměr vyzařovaného tepla,
 - efektivní spalné teplo.

6.6 Chemická analýza

Pro chemickou analýzu vzorků jsme akátové dřevo zpracovali na piliny, ve velikosti 0,5 až 1 mm. Poté jsme vzorky pilin vložili do roztoku toluenu a etanolu. Analyzovali jsme v Soxhletově aparátu za dodržení normy ASTM D1107-96. Stejná norma jsme použili pro výpočet obsahu ligninu. Pro změření obsahu jsme vybrali postup autorů Wise a kol. Množství hemicelulózy jsme určili, jako rozdíl mezi holocelulózou a celulózou, přičemž pro obsah celulózy jsme použili Seifertova metoda. U každého vzorku jsme všechna měření opakovali čtyřikrát.

7 Výsledky a diskuse

K vyhodnocení účinků faktorů na požárních charakteristiky jsme použili analýzu ANOVA a Fišerův F – test za pomoci programu Statistika 12. Dále jsme vyhodnocovali účinnost požárních charakteristik a chemického složení dřeva. Na vyhodnocení jsme použili analýzu ANOVA.

Program Statistika 12 EN jsme použili pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků. Účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemné působení jsme posuzovali podle analýzy rozptylu a Fišerova F testu s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Podle dosažených hodnot P jsme posuzovali statistickou významnost takto:

Vyhodnocování výsledků

- $P = 0$ faktor působí,
- $P = 0,05$ vliv faktorů je na hranici statistické významnosti
- $P < 0,05$ vliv faktorů je statisticky významný
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky 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

(Gaff 2009).

7.1 Hustota

V tabulce 8 jsou zaznamenány hodnoty hustoty a variačního koeficient jednotlivých vzorků před tepelnou modifikací a po tepelné modifikaci.

Tabulka 8 Hustota před a po tepelné modifikaci

Akát	Teplota	Retardér hoření	Před modifikací		Po modifikaci	
			Hustota (kg/m ³)	VK	Hustota (kg/m ³)	VK
AK	20	N	764,9	5,1	803,0	5,1
AK	160	N	733,7	1,5	690,5	2,0
AK	180	N	733,9	2,3	660,0	6,4
AK	210	N	602,0	3,8	496,7	5,5
AK	20	F	731,6	6,7	747,6	6,7
AK	160	F	675,7	1,9	622,7	3,1
AK	180	F	691,6	7,0	556,3	8,1
AK	210	F	635,2	2,2	505,5	4,4
AK	20	A	807,1	2,3	777,3	18,4
AK	160	A	692,4	6,4	590,2	7,8
AK	180	A	721,6	3,3	659,8	3,9
AK	210	A	596,4	3,4	478,4	4,0

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj: (Vlastní)

V tabulce 9 jsou zaznamenány hodnoty hustoty a variačního koeficient jednotlivých vzorků před úpravou a po úpravě retardérem hoření.

Tabulka 9 Hustota před a po úpravě retardéry hoření.

Akát	Teplota	Retardér hoření	Před úpravou		Po úpravě	
			Hustota (kg/m ³)	VK	Hustota (kg/m ³)	VK
AK	20	N	803,0	5,1	803,0	5,1
AK	160	N	690,5	1,5	690,5	1,5
AK	180	N	660,0	2,3	660,0	2,3
AK	210	N	496,7	3,8	496,7	3,8
AK	20	F	747,6	6,7	759,8	7,6
AK	160	F	622,7	1,9	635,4	6,8
AK	180	F	556,3	7,0	570,1	2,9
AK	210	F	505,5	2,2	514,6	2,6
AK	20	A	777,3	2,3	784,5	7,6
AK	160	A	590,2	6,4	598,3	6,5
AK	180	A	659,8	3,3	681,4	4,0
AK	210	A	478,4	3,4	493,5	2,4

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj: (Vlastní)

7.2 Hmotnost

V tabulce 10 jsou zaznamenány hodnoty hmotnosti vzorků před tepelnou modifikací, před úpravou retardéry hoření, po tepelné modifikaci a po úpravě retardérem hoření.

Tabulka 10: Hmotnosti vzorků

Vzorek	Před tepelnou modifikací (g)	Po tepelné modifikaci (g)	Před úpravou (g)	Po úpravě (g)
AK-20-N	144	134	134	144
AK-160-N	145	126	126	132
AK-180-N	115	91	91	112
AK-210-N	116	93	93	107
AK-20-F	148	148	148	152
AK-160-F	130	118	118	134
AK-180-F	124	104	104	127
AK-210-F	125	94	94	129
AK-20-A	155	155	155	157
AK-160-A	129	117	117	131
AK-180-A	148	125	125	150
AK-210-A	116	91	91	117

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan),

Zdroj:(Vlastní)

7.3 Maximální hodnota uvolněného tepla na jednotku plochy

Tabulka 11 nám ukazuje průměrné hodnoty a variační koeficient maximální hodnoty uvolněného tepla na jednotku plochy

Tabulka 11 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu maximálních hodnot uvolňování tepla na jednotku plochy

Maximální hodnota tepla na jednotku plochy (kW/m ²)				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	61,4	14,8
AK	160	N	57,9	19,2
AK	180	N	71,0	7,2
AK	210	N	78,2	13,0
AK	20	F	42,6	13,6
AK	160	F	40,7	19,5
AK	180	F	50,1	7,3
AK	210	F	54,9	13,1
AK	20	A	55,7	14,9
AK	160	A	53,4	19,1
AK	180	A	65,0	6,4
AK	210	A	70,9	13,0

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

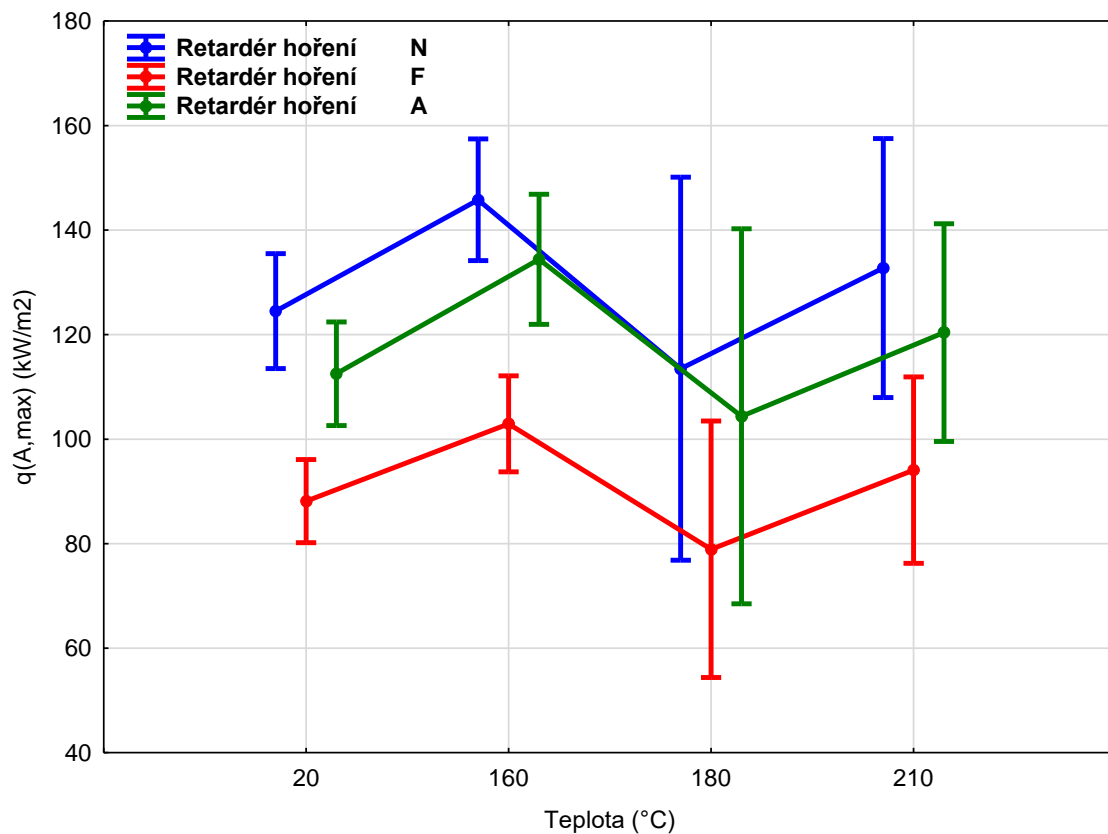
V tabulce 12 statistického hodnocení poměru maximální hodnoty uvolněného tepla na jednotku plochy jsou sledované faktory významné u retardéru hoření a intercepce, při hladině významnosti $P = 0$, tudíž faktor působí. Hodnota u teploty je statisticky významná na základě hladiny významnosti $P < 0,05$. Hladina významnosti u interakce teploty a retardéru hoření byla vyšší než $P > 0,05$ a proto není statisticky významný.

Tabulka 12 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku maximální hodnoty uvolněného tepla na jednotku plochy a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	762009,7	1	1762009,7	2618,833	0,000000
Teplota (° C)	6646,4	3	2215,5	7,797	0,000243
Retardér hoření	15343,9	2	7671,9	27,001	0,000000
Teplota (° C) * Retardér hoření	125	6	20,8	0,073	0,998336
Chyba	13638,6	48	284,1		

Zdroj:(Vlastní)

Při posuzování účinku teploty termické modifikace na maximální hodnotu uvolněného tepla na jednotku plochy (obrázek 15) sledujeme u všech sledovaných měření velmi podobný kolísavý průběh. Nejlepších výsledků dosáhl syntetický retardér hoření při teplotě 180 ° C. Nejvyšší uvolněná hodnota na jednotku tepla byla u vzorku tepelné modifikace při 160 ° C.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 15: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na maximální hodnotu uvolnění tepla na jednotku plochy

Zdroj:(Vlastní)

7.4 Čas k dosažení maximální rychlosti hoření

Tabulka 13 znázorňuje průměrné hodnoty a variační koeficient času potřebného k dosažení maximální rychlosti hoření.

Tabulka 13 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu času k dosažení maximální rychlosti hoření

Čas k dosažení maximální rychlosti hoření (s)				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	1304,2	35,4
AK	160	N	1319,0	26,4
AK	180	N	1010,2	54,6
AK	210	N	954,4	42,5
AK	20	F	925,2	36,0
AK	160	F	928,7	28,4
AK	180	F	713,9	54,8
AK	210	F	663,4	42,9
AK	20	A	1169,9	34,9
AK	160	A	1192,5	27,9
AK	180	A	916,6	54,6
AK	210	A	889,6	46,6

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

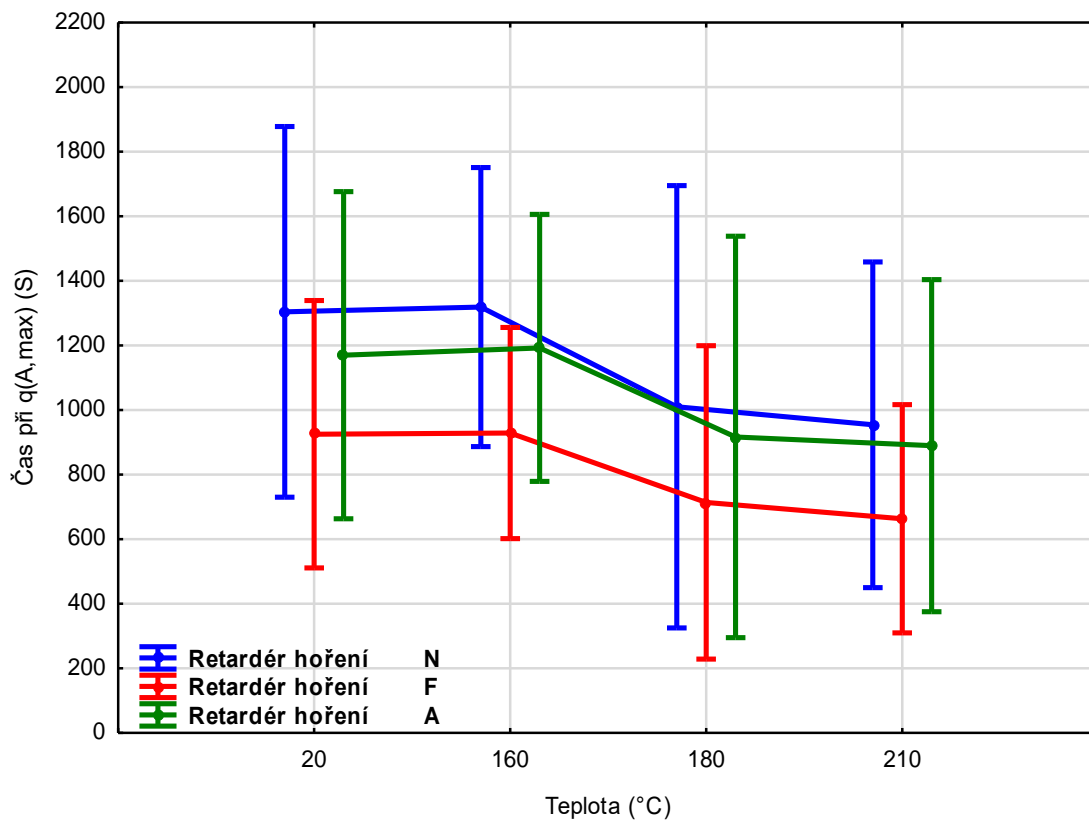
Při statistickém hodnocení má retardér hoření statistický význam při hladině $P < 0,05$. Faktor působí u intercepce při hladině významnosti $P = 0$. U zbývajících dvou faktorů teploty a interakce teplota s retardérem hoření nejsou hodnoty statisticky významné podle hladiny významnosti $P > 0,05$.

Tabulka 14 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku času k dosažení maximální rychlosti hoření a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	59876760	1	59876760	374,6570	0,000000
Teplota (° C)	1208312	3	402771	2,5202	0,069001
Retardér hoření	1206132	2	603066	3,7735	0,030057
Teplota (° C) * Retardér hoření	22441	6	3740	0,0234	0,999939
Chyba	7671242	48	159818		

Zdroj:(Vlastní)

Graf znázorňující čas potřebný k dosažení maximální rychlosti hoření nám ukazuje, že syntetický retardér hoření měl nejkratší čas k dosažení rychlosti hoření při teplotě 210 ° C. Také vidíme, že s přibývajícím teplotou čas k dosažení rychlosti hoření klesal. Přírodní retardér a tepelná modifikace měla u teplot 160 a 180 ° C téměř stejné hodnoty. U rostlého dřeva při 20 ° C byl zaznamenán nejdelší čas k dosažení maximální rychlosti hoření.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 16: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na čas k dosažení maximální rychlosti hoření

Zdroj:(Vlastní)

7.5 Celkové teplo

V tabulce 15 jsou zaznamenány průměrné hodnoty a variační koeficient celkového tepla.

Tabulka 15 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu celkového tepla

Celkové teplo (MJ/m ²)				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	163,6	4,0
AK	160	N	185,0	6,5
AK	180	N	144,4	27,1
AK	210	N	176,6	11,2
AK	20	F	114,2	3,6
AK	160	F	131,0	6,7
AK	180	F	100,4	26,1
AK	210	F	122,8	11,5
AK	20	A	147,6	4,8
AK	160	A	166,9	7,8
AK	180	A	129,8	25,4
AK	210	A	158,7	12,0

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

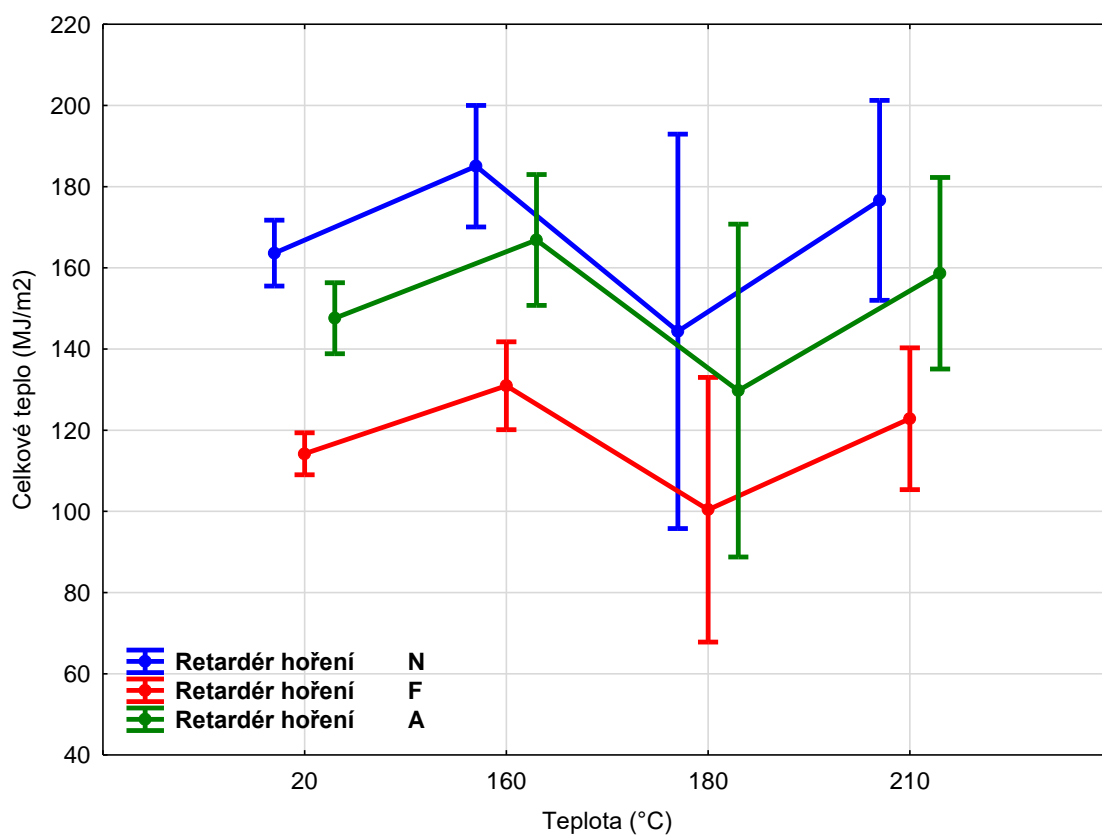
Tabulka hodnotící účinek faktorů na celkové teplo nám ukazuje, že měřené faktory intercepce a retardér hoření byly shledány jako statisticky působící, byla naměřena hodnota $P = 0$. Další měřený faktor tepelná modifikace se projevil statisticky významně, jeho hodnota nepřesáhla hladinu významnosti $P < 0,05$. Tepelná modifikace s retardérem hoření nebyla statisticky významná.

Tabulka 16 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku celkového tepla a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	1262867	1	1262867	3181,943	0,000000
Teplota (° C)	10955	3	3652	9,201	0,000065
Retardér hoření	26273	2	13137	33,099	0,000000
Teplota (° C) * Retardér hoření	174	6	29	0,073	0,998359
Chyba	19050	48	397		

Zdroj:(Vlastní)

Průběh grafu na obrázku 17 ukazuje, že samotná tepelná modifikace přírodní retardér hoření i syntetický retardér hoření měli podobný kolísavý průběh. U teploty 180 ° C zaznamenali všechny měřené vzorky nejnižších hodnot. Nejvyšší hodnoty dosáhl tepelně modifikovaný vzorek při 160 ° C. Celkově můžeme říct, že nejlepších výsledků dosáhl syntetický retardér hoření.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 17: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na celkové teplo

Zdroj:(Vlastní)

7.6 Hmotnosti při dosažení trvalého plamene

Tabulka 17 nám ukazuje průměrné hodnoty a variační koeficient hmotnosti při dosažení trvalého plamene.

Tabulka 17 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu hmotnosti trvalého plamene

Hmotnost při dosažení trvalého plamene (g)				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	151,2	4,8
AK	160	N	143,3	1,7
AK	180	N	125,7	15,4
AK	210	N	130,6	10,9
AK	20	F	105,1	4,5
AK	160	F	100,1	2,8
AK	180	F	87,4	15,9
AK	210	F	90,8	11,0
AK	20	A	136,8	3,4
AK	160	A	129,3	1,4
AK	180	A	115,8	17,5
AK	210	A	117,3	11,6

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

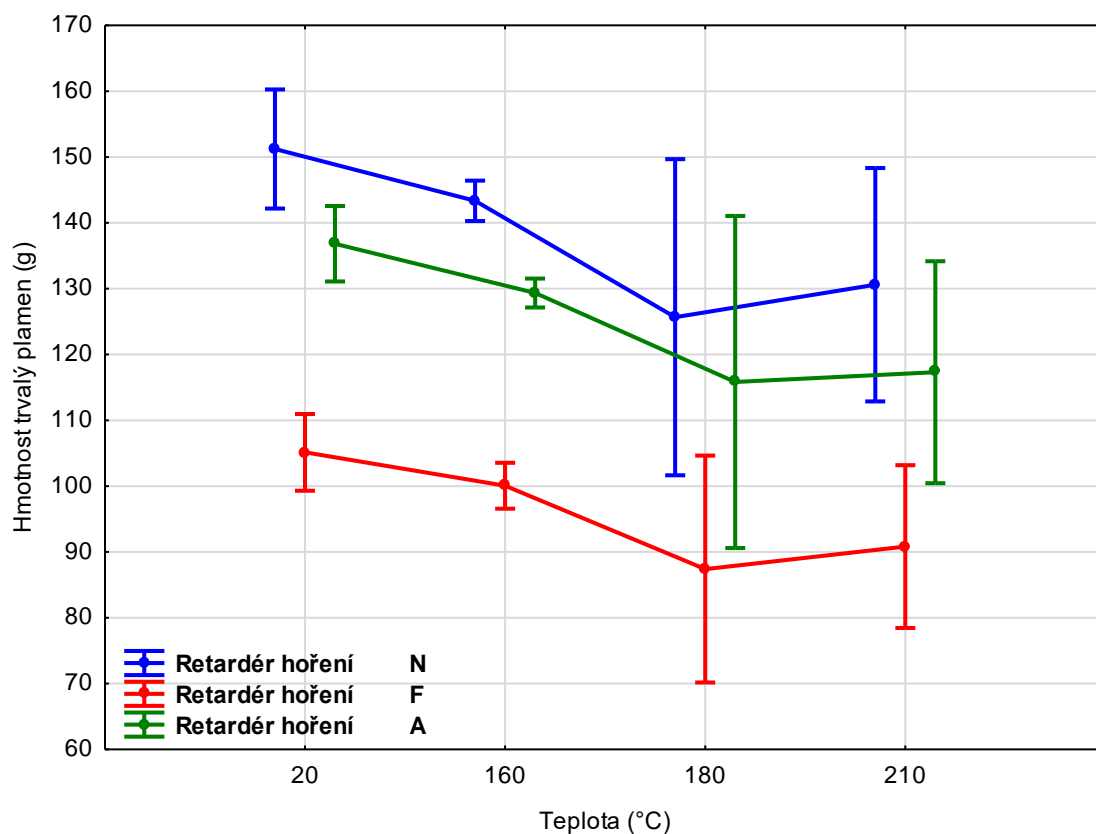
V níže uvedené tabulce je zřejmé, že dva faktory intercepce a retardér hoření mají hladinu významnosti $P = 0$, a proto působí. V případě teploty je faktor statisticky významný, protože hladina významnosti je menší než $P < 0,05$. Další měřený faktor je tepelná modifikace s retardérem hoření, kde je hodnota vyšší než 0,05 tudíž je tento faktor statisticky nevýznamný.

Tabulka 18 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku hmotnosti při trvalém plamenu a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	856242,3	1	856242,3	6501,558	0,000000
Teplota (° C)	4455,9	3	1485,3	11,278	0,000010
Retardér hoření	18379,5	2	9189,8	69,779	0,000000
Teplota (° C) * Retardér hoření	106,8	6	17,8	0,135	0,991044
Chyba	6321,5	48	131,7		

Zdroj:(Vlastní)

Po vyhodnocení grafu na obrázku 18 můžu tvrdit, že i zde mají křivky podobný klesající charakter s přibývajícím teplotou. V případě přírodního retardéru klesala křivka od 20 ° C do 180 °C, u teploty 210 °C byla hodnota mírně vyšší. I zde dosáhl nejlepších vlastností syntetický retardér hoření při všech teplotách.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 18: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na hmotnost trvalého plamene

Zdroj:(Vlastní)

7.7 Hmotnost po ukončení testu

Tabulka 19 nám ukazuje průměrné hodnoty a variační koeficient požární charakteristiky hmotnosti po ukončení testu.

Tabulka 19 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu hmotnosti po ukončení testu

Hmotnost po ukončení testu (g)				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	55,0	11,5
AK	160	N	54,5	1,9
AK	180	N	58,0	6,8
AK	210	N	49,4	11,8
AK	20	F	38,5	13,0
AK	160	F	38,5	2,6
AK	180	F	40,4	6,9
AK	210	F	34,5	12,6
AK	20	A	49,9	11,1
AK	160	A	49,1	1,3
AK	180	A	54,3	6,9
AK	210	A	44,4	12,4

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

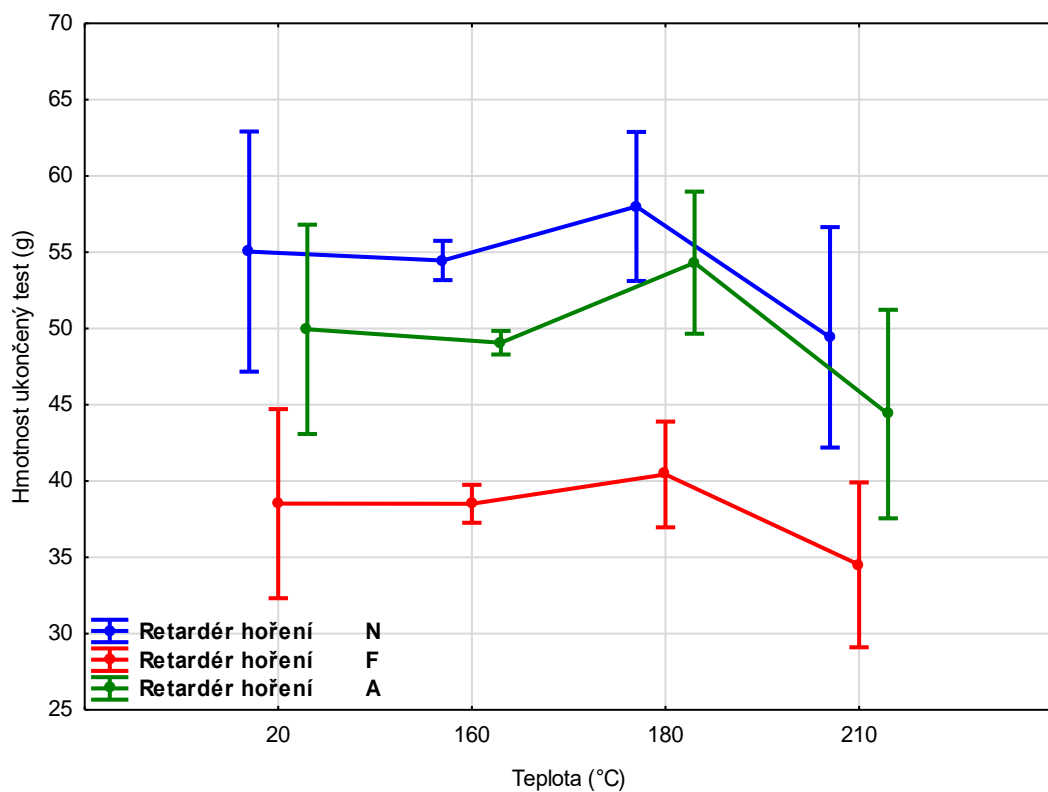
Tabulka 20 ukazuje, že hodnoty P u intercepce a retardéru hoření jsou rovny $P = 0$ faktory zde působí. U sledovaného faktoru tepelné modifikace byla dosažena hladina významnosti pod $P < 0,05$ a proto můžeme tvrdit, že je výsledek statisticky významný. Jediný faktor tepelná modifikace s retardérem hoření se neprokázal jako statisticky významný, protože přesáhl hladinu významnosti $P < 0,05$.

Tabulka 20 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku hmotnost po ukončení testu a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	133768,0	1	133786,0	7345,117	0,000000
Teplota (°C)	507,4	3	169,1	9,287	0,000060
Retardér hoření	2783,8	2	1391,9	76,428	0,000000
Teplota (°C) * Retardér hoření	24,3	6	4,0	0,222	0,967776
Chyba	874,2	48	18,2		

Zdroj:(Vlastní)

I zde vidíme, že výraznou roli hrála teplota vzorků. U syntetického retardéru hoření vidíme od 20 ° C do 180 ° C jen lehké kolísání, ale mezi teplotami 180 a 210 ° C dojde k výraznému poklesu. Tento trend se projevuje jak u přírodního retardéru, tak u tepelně modifikovaných vzorků u teplot 180 a 210 ° C, kdy je rozdíl nejvýraznější.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 19: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na hmotnost po ukončení testu

Zdroj:(Vlastní)

7.8 Úbytek hmotnosti

Tabulka 21 nám ukazuje průměrné hodnoty a variační koeficient úbytku hmotnosti.

Tabulka 21 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu úbytku hmotnosti

Úbytek hmotnosti (g/m ²)				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	9868,8	5,8
AK	160	N	10054,2	2,6
AK	180	N	7655,6	26,2
AK	210	N	9183,4	10,5
AK	20	F	6927,4	7,2
AK	160	F	7023,1	3,8
AK	180	F	5292,4	25,0
AK	210	F	6433,9	12,2
AK	20	A	8866,9	7,9
AK	160	A	9142,1	2,9
AK	180	A	6917,5	26,8
AK	210	A	8387,5	11,1

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

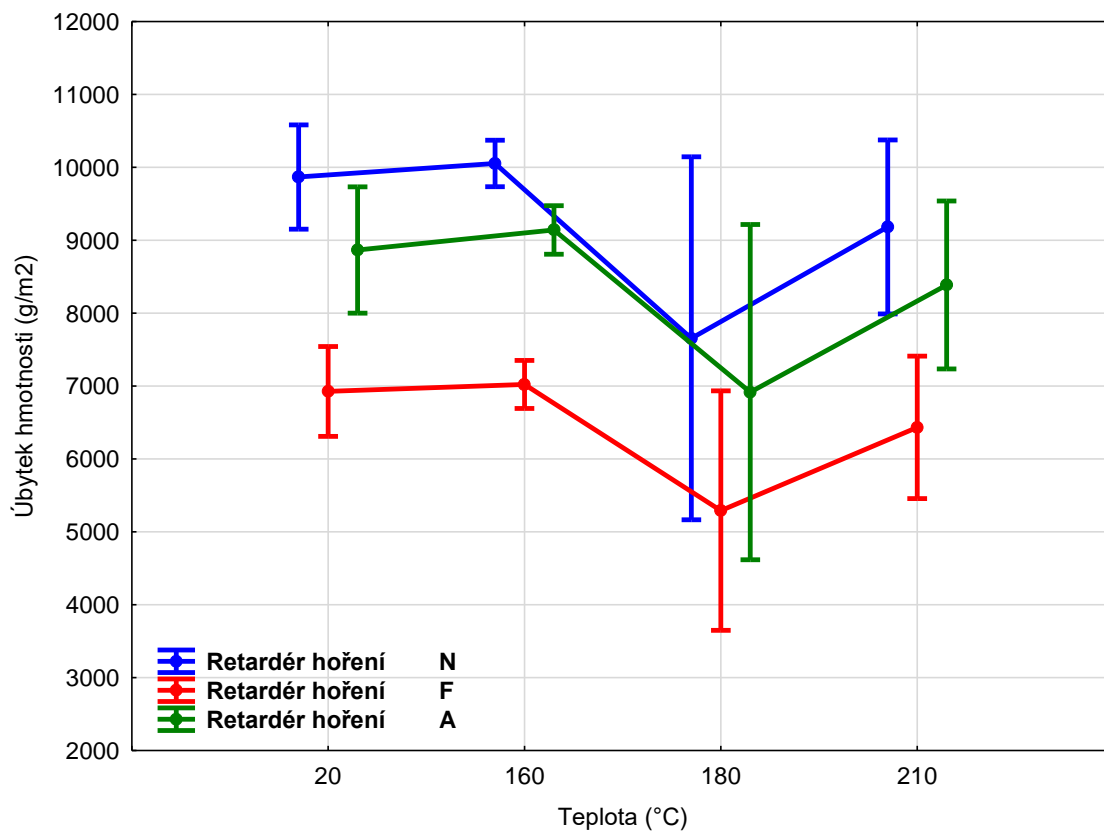
V tabulce je vidět, které faktory se ukázali jako statisticky významné. První a třetí měřený faktor intercepce a retardér hoření jsou faktory, které statisticky působí při $P = 0$. Pokud bychom hodnotili čtvrtý měřený faktor tepelnou modifikaci s retardérem hoření není jeho hodnota statisticky významná podle významnosti $P < 0,05$. V případě samotné tepelné modifikace je statisticky dokázáno, že hodnota je statisticky významná při hladině $P < 0,05$.

Tabulka 22 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku úbytku hmotnosti a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	3,82025E+09	1	3,82025E+09	3558,418	0,000000
Teplota (° C)	4,128462E+07	3	1,376154E+7	12,818	0,000003
Retardér hoření	8,045758E+07	2	4,022879E+07	37,472	0,000000
Teplota (° C) * Retardér hoření	7,214866E+05	6	1,202478E+05	0,112	0,994603
Chyba	5,153191E+07	48	1,073581E+06		

Zdroj:(Vlastní)

Úbytek hmotnosti v grafu nám ukazuje, že nejvyšší úbytek hmotnosti dosahovaly vzorky u tepelné modifikace při 20 a 160 ° C. Nejmenšího úbytku hmotnosti bylo dosaženo při teplotě 180 ° C u syntetického retardéru hoření. Přírodní retardér hoření měl blíže k hodnotám naměřeným u tepelně upravených vzorků, nejnižší hodnoty byly opět zaznamenány při teplotě 180 °C. Celkově byl úbytek hmotnosti výrazně nižší u všech teplot syntetického retardéru hoření.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 20: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na úbytek hmotnosti

Zdroj:(Vlastní)

7.9 Rychlost úbytku hmotnosti

Tabulka 23 nám ukazuje průměrné hodnoty a variační koeficient rychlosti úbytku hmotnosti.

Tabulka 23 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu rychlost úbytku hmotnosti

Rychlost úbytku hmotnosti (g/m ²)				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	5,7	5,8
AK	160	N	5,8	2,7
AK	180	N	5,2	5,5
AK	210	N	5,3	10,2
AK	20	F	4,0	5,4
AK	160	F	4,1	4,0
AK	180	F	3,6	5,0
AK	210	F	3,7	11,0
AK	20	A	5,2	6,3
AK	160	A	5,3	6,3
AK	180	A	4,9	9,4
AK	210	A	4,8	11,6

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

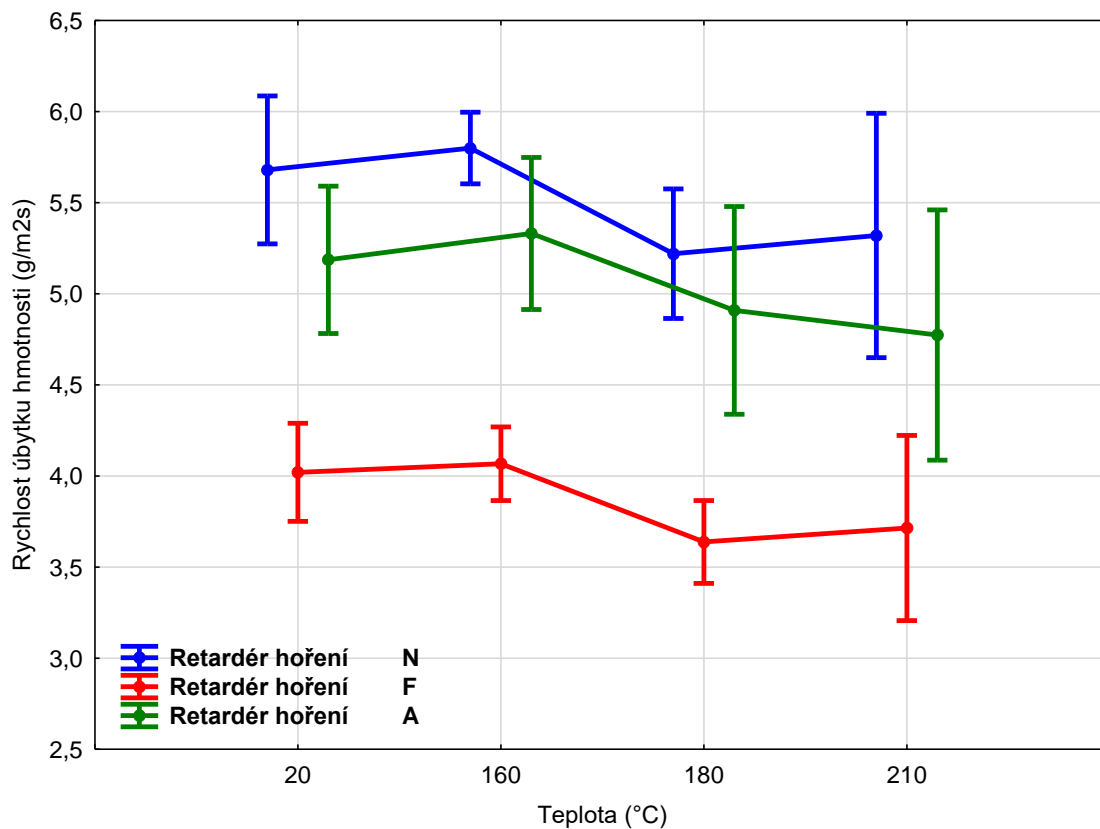
Faktor tepelné modifikace dosáhl nižší hodnoty, než je 0,05 a proto je tento faktor statisticky významný. Stejně jako u měření úbytku hmotnosti jsou měřené faktory intercepce a retardérů hoření vyhodnoceny jako působící. Z hlediska významnosti nedosáhla statistické významnosti tepelná modifikace s retardérem hoření.

Tabulka 24 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku rychlost úbytku hmotnosti a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	1385,299	1	13585,299	10961,61	0,000000
Teplota (° C)	2,707	3	0,902	7,14	0,000464
Retardér hoření	28,863	2	14,431	114,19	0,000000
Teplota (° C) * Retardér hoření	0,123	6	0,020	0,16	0,985526
Chyba	60066	48	0,126		

Zdroj:(Vlastní)

Na obrázku 21 si můžeme všimnout u přírodního retardéru hoření mírně odlišného průběhu, než u syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace, kdy měla nižší hodnotu při teplotě 210 °C. Nejnižší rychlost úbytku hmotnosti byla naměřena syntetickému retardéru hoření při teplotě 180 ° C. Hodnoty přírodního retardéru byly mírně nižší než u tepelné modifikace, pouze u teploty 210 °C byl zaznamenán větší rozdíl.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 21: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na rychlost úbytku hmotnosti

Zdroj:(Vlastní)

7.10 Rychlost úbytku hmotnosti hoření 10–90 %

Tabulka 25 nám ukazuje průměrné hodnoty a variační koeficient rychlosti hmotnosti hoření při 10-90 %.

Tabulka 25 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu rychlosti hmotnosti hoření 10-90%

Rychlost úbytku hmotnosti 10-90 % (g/m ²)				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	6,0	5,2
AK	160	N	6,2	3,3
AK	180	N	5,5	5,4
AK	210	N	5,7	10,0
AK	20	F	4,2	5,9
AK	160	F	4,4	3,8
AK	180	F	3,9	3,6
AK	210	F	4,1	10,1
AK	20	A	5,4	7,3
AK	160	A	5,5	4,9
AK	180	A	5,0	4,6
AK	210	A	5,2	10,7

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

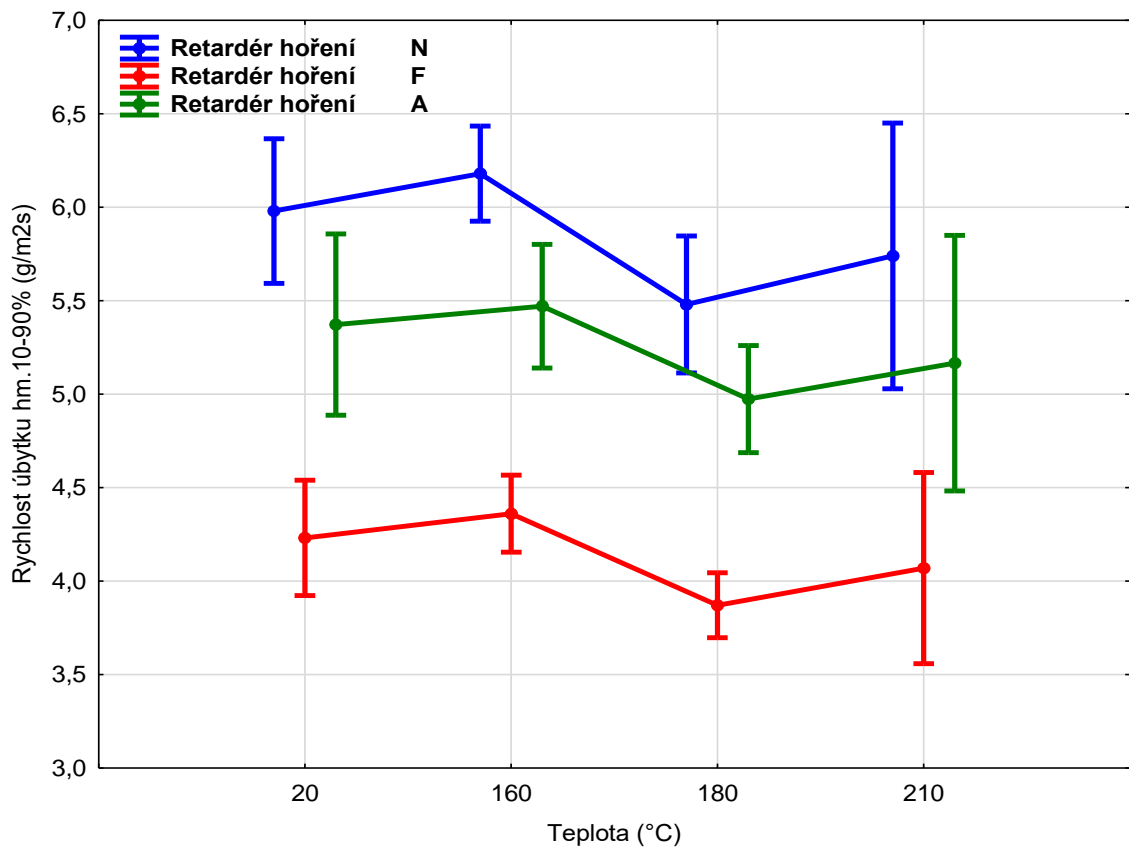
Sledované parametry intercepce a retardérů hoření jsou vyhodnoceny jako působící faktory $P = 0$. Tepelná modifikace prokázala statistický význam a její hodnota nepřekročila hladinu významnosti $P > 0,05$. Poslední sledovaný faktor tepelná modifikace s retardérem hoření se neprokázal, jako statisticky významný.

Tabulka 26 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku rychlosti úbytku hmotnosti 10–90 % a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	1545,209	1	1545,209	13132,14	0,000000
Teplota (° C)	2,701	3	0,900	7,65	0,000280
Retardér hoření	30,179	2	15,089	128,24	0,000000
Teplota (° C) * Retardér hoření	0,080	6	0,013	0,11	0,994521
Chyba	5,648	48	0,118		

Zdroj:(Vlastní)

Pokud se podíváme na grafy rychlosti úbytku hmotnosti a rychlosti úbytku hmotnosti od 10 do 90 % zjistíme, že v grafickém znázornění si jsou průběhy velmi podobné. I zde vidíme, že největší rychlosti úbytku hmotnosti zaznamenaly tepelně upravené vzory, naopak nejnižších hodnot dosáhl syntetický retardér.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 22: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na rychlost úbytku hmotnosti hoření 10-90 %

Zdroj:(Vlastní)

7.11 Marhe maximální průměr vyřazovaného tepla

V tabulce 27 vidíme průměrné hodnoty a variační koeficienty maximálního průměru vyřazovaného tepla.

Tabulka 27 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu Marhe maximálního průměru vyřazovaného tepla

MERHE				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	91,0	4,0
AK	160	N	102,9	6,5
AK	180	N	80,3	27,0
AK	210	N	98,3	11,1
AK	20	F	64,4	4,1
AK	160	F	72,3	6,3
AK	180	F	56,0	28,2
AK	210	F	68,5	11,0
AK	20	A	80,7	4,1
AK	160	A	93,2	6,5
AK	180	A	75,9	30,9
AK	210	A	87,2	11,2

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj: (Vlastní)

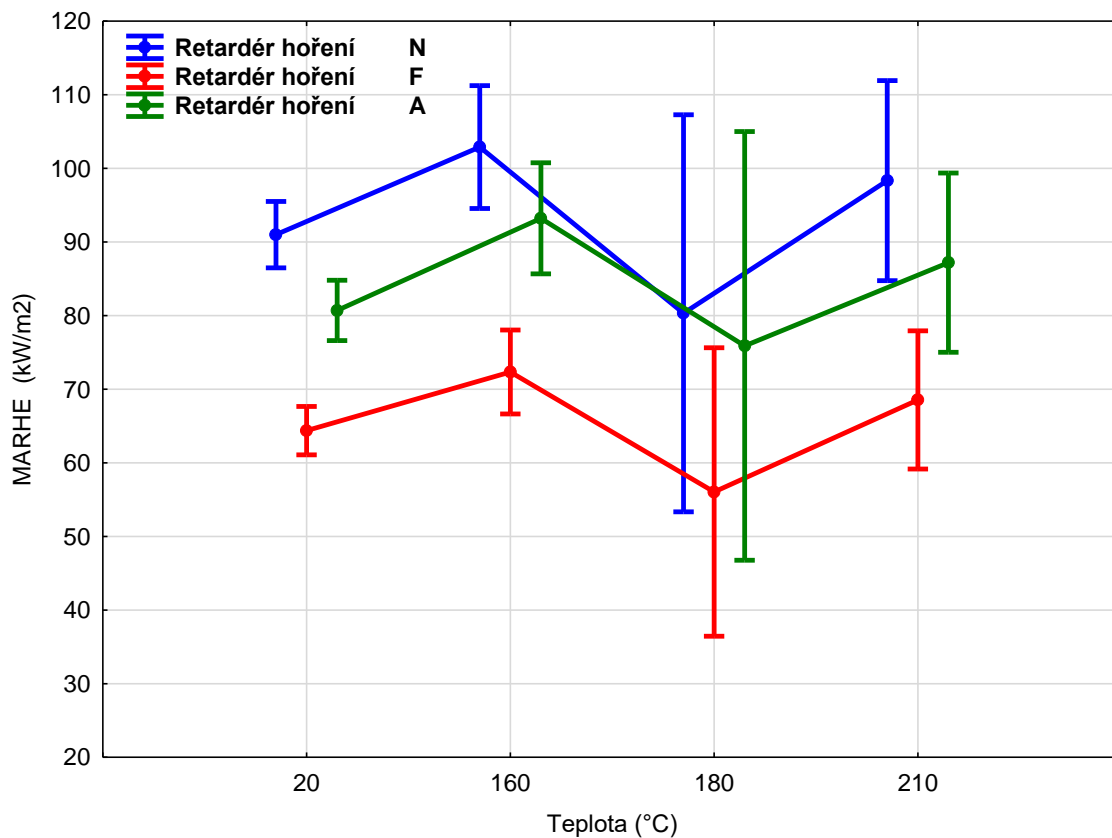
Předposlední sledovaná charakteristika hoření je Marhe maximální průměr vyřazovaného tepla. V tabulce dosáhly dva sledované faktory intercepce a retardéru hoření hodnoty $P = 0$ a proto faktory působí. Faktor teplota má hladinu významnosti $P < 0,05$, a proto je statisticky významný. Tepelná modifikace s retardérem hoření není statisticky významná, protože je hladina významnosti vyšší než $P < 0,05$.

Tabulka 28 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku maximálního průměru vyzařovaného tepla (Marhe) a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	392746,6	1	392746,6	2808,756	0,000000
Teplota (° C)	2939,6	3	979,9	7,008	0,000529
Retardér hoření	8072,1	2	4036,1	28,864	0,000000
Teplota (° C) * Retardér hoření	107,4	6	17,9	0,128	0,992256
Chyba	6711,8	48	139,8		

Zdroj:(Vlastní)

Na obrázku 23 je zaznamenán průběh měření maximálního průměru vyzařovaného tepla. Přírodní retardér měl nejnižší hodnoty při 180 ° C, ale i tak nedosahoval hodnot syntetického retardéru hoření.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 23: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na maximální průměr vyzařovaného tepla (Marhe)

Zdroj:(Vlastní)

7.12 Efektivní spalné teplo

V tabulce 29 vidíme průměrné hodnoty a variační koeficient efektivního spalného tepla.

Tabulka 29 Tabulka průměrných hodnot a variačního koeficientu efektivního spalného tepla

Efektivní spalné teplo				
Akát	Teplota (° C)	Retardér hoření	Průměr	VK
AK	20	N	16,6	4,7
AK	160	N	18,4	4,8
AK	180	N	18,8	3,6
AK	210	N	19,2	3,1
AK	20	F	11,8	5,5
AK	160	F	12,9	6,7
AK	180	F	13,1	4,5
AK	210	F	13,4	4,0
AK	20	A	14,7	6,3
AK	160	A	16,5	6,2
AK	180	A	17,3	7,8
AK	210	A	17,0	6,1

AK – Akát, N – bez retardéru hoření, F – syntetický retardér (Flamgard), A – přírodní retardér hoření (Arabinogalaktan), VK – variační koeficient

Zdroj:(Vlastní)

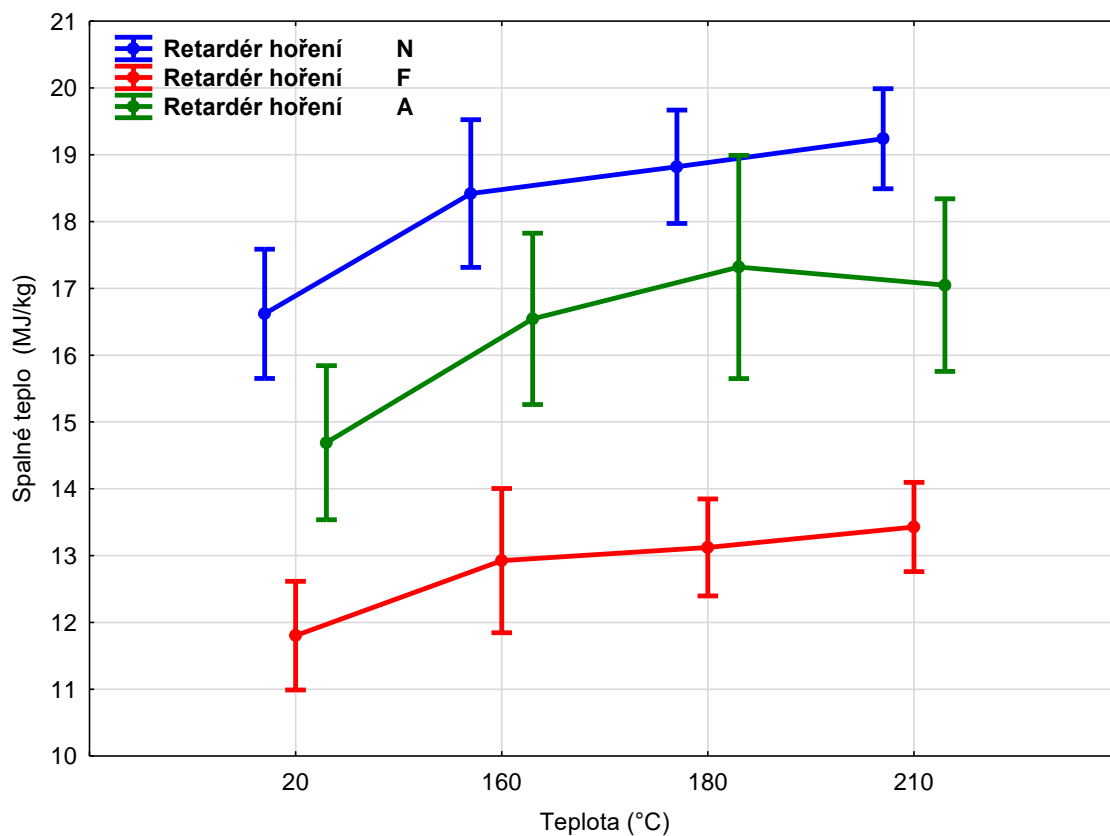
Poslední měřená charakteristika je efektivní spalný teplo. V tabulce je vidět, že tři faktory intercepce, tepelná modifikace a retardér hoření se prokázaly jako působící faktory, při hodnotě $P = 0$. Tepelná modifikace s retardérem hoření přesáhli statisticky významnou hodnotu 0,05 a proto není statisticky významná.

Tabulka 30 Hodnotící účinek jednotlivých faktorů na sledovanou charakteristiku efektivní spalné teplo a jejich interakci

Faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Intercepce	15038,76	1	15038,76	20359,25	0,000000
Teplota (° C)	45,70	3	15,23	20,62	0,000000
Retardér hoření	307,35	2	153,68	208,05	0,000000
Teplota (° C) * Retardér hoření	2,83	6	0,47	0,64	0,698612
Chyba	35,46	48	0,74		

Zdroj:(Vlastní)

Na tomto posledním grafu si můžeme všimnout, že s přibývajícím teplotou nám roste i efektivní spalné teplo, kromě hodnoty přírodního retardéru při teplotě 210 ° C, kdy dochází k mírnému poklesu. V případě syntetického retardéru a tepelně modifikovaných vzorků vidíme téměř lineární průběh s mírným nárůstem mezi teplotami 160 až 210 ° C. Nejnižších hodnot efektivního spalného tepla dosáhl syntetický retardér hoření.



N – bez retardérů hoření jen tepelná úprava, F – syntetický retardér hoření Flamgard, A – přírodní retardér hoření Arabinogalaktan

Obrázek 24: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty termické modifikace na sledovanou charakteristiku efektivní spalné teplo

Zdroj:(Vlastní)

7.13 Chemická analýza

V tabulce číslo 31 jsou zaznamenány průměrné hodnoty a variační koeficienty extraktu, ligninu, holocelulózy, celulózy a hemicelulózy.

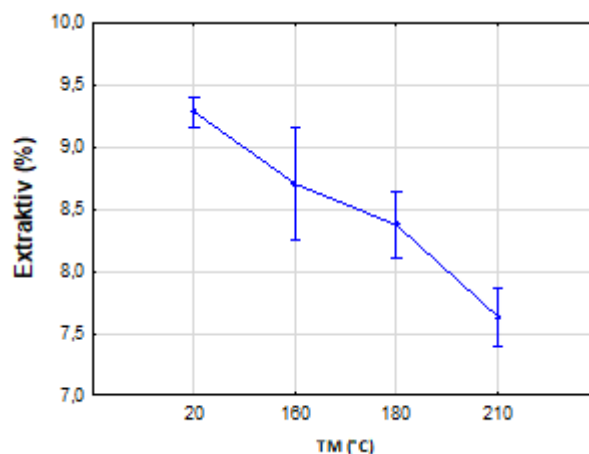
Tabulka 31 Průměrné hodnoty a variačního koeficientu

TM (°C)	Extrakt (%)	VK (%)	Lignin (%)	VK (%)	Holocelulóza (%)	VK (%)	Celulóza (%)	VK (%)	Hemicelulóza (%)	VK (%)
20	9,29	0,82	25,31	0,55	68,46	0,6	40,5	0,53	27,96	0,7
160	8,71	3,32	23,95	2,14	67,35	0,29	44,88	0,18	22,47	1,1
180	8,38	2,03	25,23	0,54	63,97	0,25	47,63	0,42	16,33	2,1
210	7,64	1,93	28,82	0,25	59,3	0,28	54,45	0,51	4,85	4,44

VK: Variační koeficient, TM: Tepelná modifikace

Zdroj:(Vlastní)

Na grafu extrakt je vidět, jak s přibývajícím teplotou klesá procentuální poměr extraktu. Nejnižších hodnot dosáhl modifikovaný akát při teplotě 210 ° C.

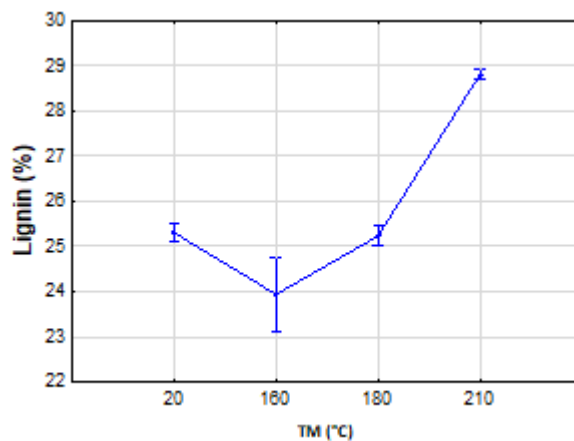


TM – tepelná modifikace

Obrázek 25: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu extraktu

Zdroj:(Vlastní)

Na obrázku si můžeme všimnout nejvyšší hodnoty při teplotě 160 ° C. Při teplotách 180 a 210 ° C vidíme strmý nárůst procentuálního úbytku ligninu. Teploty 20 a 180 mají téměř stejný úbytek ligninu.

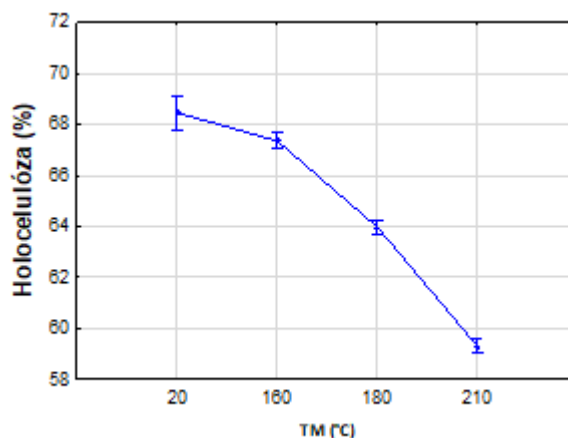


TM – tepelná modifikace

Obrázek 26: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu ligninu

Zdroj:(Vlastní)

Graf znázorňující obsah holocelulózy nám ukazuje snižující se procentuální obsah holocelulózy s přibývajícím teplotou. Rozdíl mezi 20 a 160 ° C je mírný ovšem mezi 160, 180 a 210 ° C je rozdíl vyšší, dá se říct, že od 160 do 210 ° C klesá úbytek holocelulózy téměř lineárně.

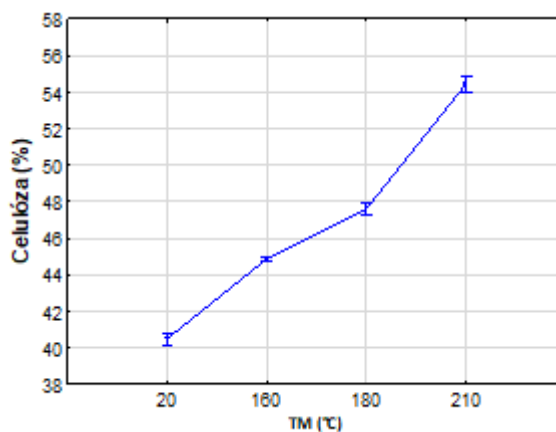


TM – tepelná modifikace

Obrázek 27: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu holocelulózy

Zdroj:(Vlastní)

Podíváme-li se na graf celulózy, vidíme stoupající procentuální obsah celulózy s přibývajícím teplotou. Při 20 ° C jsme se dostali lehce nad 40 % obsahu celulózy. Při teplotě 210 ° C je obsah už přes 54 %.

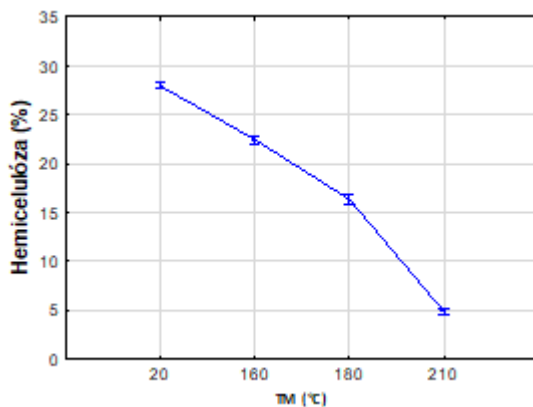


TM – tepelná modifikace

Obrázek 28: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu celulózy

Zdroj:(Vlastní)

Na posledním grafu chemické analýzy je vidět obsah hemicelulózy, který se zvyšující se teplotou klesá. Nejvyšší obsah byl zaznamenán na vzorcích při teplotě 20 °C, hodnota se pohybovala okolo 27 %. Naopak nejlepších hodnot bylo dosaženo při teplotě 210 °C, kdy se hodnota dostala k 5 %.



TM – tepelná modifikace

Obrázek 29: Graf 95 % intervalu spolehlivosti ukazující účinek teploty na tepelné modifikace na hodnotu hemicelulózy

Zdroj:(Vlastní)

V tabulce číslo 32 můžeme vidět statistickou významnost, extraktivu, ligninu, holocelulózy, celulózy i hemicelulózy, které dosáhli hodnot 0 při významnosti P. A proto můžeme říct, že jedno faktorová analýza nám potvrdila, že sledované faktory intercepce a tepelně upraveného dřeva působí při hladině významnosti $P = 0$.

Tabulka 32 Jednofaktorová analýza rozptylu hodnotící účinek teploty na hodnotu změn chemických komponentů

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Extraktiv (%)					
Intercepce	1156,170	1	1156,170	33098,44	0,000000
TM (°C)	5,671	3	1,890	54,12	0,000000
Chyba	0,419	12	0,035		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Lignin (%)					
Intercepce	10671,41	1	10671,41	139758,1	0,000000
TM (°C)	52,56	3	17,52	229,4	0,000000
Chyba	0,92	12	0,08		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Holocelulóza (%)					
Intercepce	67117,26	1	67117,26	1031978	0,000000
TM (°C)	203,15	3	67,72	1041	0,000000
Chyba	0,78	12	0,07		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Celulóza (%)					
Intercepce	35140,46	1	35140,46	838226,5	0,00
TM (°C)	410,27	3	136,76	3262,1	0,00
Chyba	0,50	12	0,04		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F – Test	Úroveň významnosti P
Hemicelulóza (%)					
Intercepce	5128,294	1	5128,294	77864,37	0,00
TM (°C)	1178,795	3	392,932	5966,00	0,00
Chyba	0,790	12	0,066		

TM: tepelná modifikace

Zdroj:(Vlastní)

Tabulka 33 nám ukazuje korelační analýzu, ve které můžeme sledovat jednotlivé interakce mezi sledovanou charakteristikou a chemickými komponenty.

Tabulka 33 Hodnoty korelačního koeficientu mezi chemickými komponenty a sledovanými charakteristikami

	Extraktiva (%)	Lignin (%)	Holocelulóza (%)	Celulóza (%)	Hemicelulóza (%)
Maximální hodnota uvolňovaného tepla na jednotku plochy (kW/m ²)	0,02943	0,0597	0,05586	0,01140	0,01659
Čas k dosažení maximální rychlosti hoření (s)	0,37608	0,2593	0,34132	0,2989	0,31816
Celkové teplo (MJ/m ²)	0,1E-3	0,2349	0,01471	0,4305	0,0192
Hmotnost trvalého plamene (g)	0,35089	0,1857	0,32282	0,3200	0,32284
Hmotnost po ukončení testu (g)	0,21136	0,2673	0,21001	0,2105	0,21138
Úbytek hmotnosti (g)	0,22910	0,0761	0,21940	0,1801	0,19745
Rychlost úbytku hmotnosti (g/m ² s)	0,20954	0,1775	0,22716	0,2016	0,21333
Rychlost úbytku hmotnosti 10-90 % (g/m ² s)	0,14426	0,1034	0,16153	0,1329	0,14551

	Extraktiva (%)	Lignin (%)	Holocelulóza (%)	Celulóza (%)	Hemicelulóza (%)
Marže maximální průměr vyřazovaného tepla (kW/m ²)	0,00422	0,01267	0,1369	0,04321	0,0197
Efektivní spalné teplo (MJ/kg)	0,2979	0,12645	0,2658	0,2884	0,2807

r < 10 % nízká závislost, 10 % < r ≤ 25 % mírná závislost, 25 % ≤ r < 50 % významná závislost, 50 % ≤ r < 80 % vysoká závislost

Zdroj:(Vlastní)

8 Závěr

Pro měření jsme měli 3 sady vzorků akátového dřeva, vzorky bez retardéru hoření, vzorky s přírodním retardérem hoření (Arabinogalaktan) a vzorky se syntetickým retardérem hoření (Flamgard). Předmětem zkoumání byl nejen vliv retardéru na rostlé dřevo, ale i dřevo termicky upravené (160 °C, 180 °C, 210 °C). Sledovali jsme 10 charakteristik hoření: maximální hodnota uvolňování tepla na jednotku plochy, čas k dosažení maximální rychlosti hoření, celkové teplo, MERHE, hmotnost při dosažení trvalého plamene, hmotnost při ukončení testu, úbytek hmotnosti, rychlost úbytku hmotnosti, rychlost úbytku hmotnosti 10-90 %, efektivní spalné teplo. Abychom mohli sledovat změny obsahu jednotlivých složek dřeva, provedli jsme chemickou analýzu, při které jsme sledovali množství jednotlivých složek dřeva (celulóza, holocelulóza, hemicelulóza a lignin).

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků jsme použili program Statistika 12 EN. Účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemné působení jsme posuzovali podle analýzy rozptylu a Fišerova F testu s hladinou významnosti $P = 0,05$. Abychom zjistili možnou závislost charakteristik hoření na chemickém složení hodnotili jsme pomocí Spearmanovi korelace.

Na základě významnosti hodnoty P byl pro všechny sledované charakteristiky hoření hodnocen vliv jednotlivých faktorů teploty, retardéru hoření i vzájemná interakce teploty a retardérů hoření. Vliv jednotlivých faktorů teploty a retardéru hoření se projevil jako statisticky významný u těchto charakteristik hoření: maximální hodnota uvolňování tepla na jednotku plochy, celkové teplo, hmotnost při dosažení trvalého plamene, hmotnost po ukončení testu, úbytek hmotnosti, rychlost úbytku hmotnosti, rychlost úbytku hmotnosti 10-90 %, MERHE a efektivní spalné teplo. Jako jediný statisticky významný faktor, který působil na charakteristiku hoření čas potřebný k dosažení maximální rychlosti hoření se projevil jako retardér hoření. Na všechny sledované charakteristiky hoření neměla statistický vliv interakce tepelné modifikace s retardérem hoření, všechny hodnoty přesáhly hodnoty významnosti $P < 0,05$.

Hodnocení výsledků charakteristik hoření začnu vyhodnocením maximální hodnoty uvolněného tepla na jednotku plochy. Účinek přírodního retardéru hoření se neprokázal, stejně jako se účinek neprokázal u tepelně upraveného dřeva bez použití retardérů. Přesto hodnoty uvolněného tepla na jednotku plochy byly u přírodního retardéru i syntetického nižší než u vzorků termicky modifikovaného.

Jako druhá charakteristika hoření byl sledován čas potřebný k dosažení maximální rychlosti hoření. Nejnižší čas k dosažení maximální rychlosti hoření se projevil u syntetického retardéru hoření. Vliv přírodního retardéru hoření a vzorků tepelně upravených byl velmi podobný a účinnost se téměř neprojevila.

Pro charakteristiku hoření celkové teplo se projevil pozitivně syntetický retardér hoření, který nejvíce působil při teplotě 180 ° C. Účinek přírodního retardéru hoření ve srovnání se syntetickým retardérem hoření vykazoval vyšší hodnoty tepla, podobně jako vzorky tepelně upravené.

Při hodnocení úbytku hmotnosti bylo opět dosaženo nejnižších hodnot u syntetického retardéru hoření. U všech vzorků tepelně upravených na 180 ° C s retardéry hoření nebo bez retardéru hoření byl úbytek hmotnosti nejnižší, ale odchylky naměřených hodnot byly výrazné, proto nebyl prokázán statisticky významný vliv na úbytek hmotnosti.

U charakteristik hoření rychlosti úbytku hmotnosti a rychlosti úbytku hmotnosti 10-90 % byly pozorovány velmi podobné výsledky, kdy se syntetický retardér projevil jako významný. Pozitivní vliv se projevil u vyšších tepelně upravených vzorků při teplotách 180 a 210 ° C, nejnižší hodnoty vykazovaly vzorky se syntetickým retardérem, a naopak nejvyšší hodnoty vykazovaly vzorky tepelně upravené.

Další sledovanou charakteristikou hoření byl maximální průměr vyzařovaného tepla, (MERHE) u kterého se projevil jako účinný syntetický retardér.

Poslední sledovaná charakteristika hoření je efektivní spalné teplo. U efektivního spalného tepla se s přibývajícím teplotou u všech sledovaných vzorků zvyšovalo efektivní spalné teplo. Jen u přírodního retardéru jsme pozorovali mírný pokles hodnoty při 210 °C.

Po vyhodnocení vlivu jedno-faktorové analýzy termické modifikace na chemické složení dřeva, můžeme tvrdit, že všechny složky dřeva byly statisticky významné. Zaměříme-li se na obsah extraktu, jeho obsah s přibývajícím teplotou tepelné modifikace klesá. Podíl ligninu při 160 °C klesne na nejnižší hodnotu, a dále se zvyšuje, dosáhne vyšších hodnot u teploty 210 °C než u teploty 20 °C. Obsah holocelulózy a hemicelulózy klesá s přibývajícím teplotou téměř lineárně. Podíl celulózy stoupá se zvyšující se teplotou, kde nejnižších hodnot dosáhla při 20 °C a to kolem 40 % nejvyšší hodnotu měla celulóza při teplotě 210 °C přibližně 54 %.

Z výše uvedených výsledků byla syntetickému retardéru hoření prokázána účinnost cca 30 % u sledovaných charakteristik hoření. Přírodní retardér hoření u sledovaných charakteristik hoření prokázal nižší účinnost cca 10 %, přesto měřené vzorky s přírodním retardérem měli mírně pozitivní vliv na sledované charakteristiky hoření ve srovnání s se vzorky termicky modifikovanými. U termické modifikace nebyla prokázána účinnost. Vliv tepelné modifikace na chemické složení dřeva nám prokázala statistický vliv u všech sledovaných faktorů.

V dalším výzkumu je třeba se zaměřit zejména na zlepšení přilnavosti retardéru k povrchu tak, aby byla vytvořena dostatečná ochranná vrstva, nebo zajistit lepší prostupnost retardéru pod povrch dřeva. Na základě těchto nedostatků bych doporučil zvýšit přilnavost, například delším působením arabinogalaktanů, nebo obohacením roztoku látkou zvyšující přilnavost ke dřevu.

Seznam použité literatury

- Asdrubali, F., B. F., Lombardi, L., Guttari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (Březen 2017). Přehled strukturních, termofyzikálních, akustických a environmentálních vlastností dřevěných materiálů pro stavební aplikace. *ScienceDirect*, stránky 307-332.
- Barber, D. R. (2015). *Fire science reviews*. Načteno z <https://firesciencereviews.springeropen.com/>:
<https://firesciencereviews.springeropen.com/articles/10.1186/s40038-015-0009-3>
- Bartlett, A., Hadden, R., & Bisby, L. (15. Leden 2019). A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. *SpringerLink*.
- Blažej A., k. (1975). *Chémia dreva*. Bratislava: Alfa.
- Boonstra, M., Acker, V. j., Tjeerdsma, F. B., & Kegel, V. (11. Říjen 2007). Strength properties of thermally modified softwoods and its relation. *Annals of forest science*, stránky 679-690.
- Colomba, D. (Únor 2008). Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *ScienceDirect*, stránky 47-90. Načteno z <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.12.001>
- Costes, L., Laoutid, F., Brohez, S., & Dubois, P. (29. Duben 2017). Biologické zpomalovače hoření: Když se příroda setká s požární ochranou. *Luxemburg institute of science and technologi*, stránky 1-25.
- Crowl, A. D. (2010). *Understanding explosions*. New York: John Wiley & Sons .
- Čekovská, H. G. (2017). *Researchgate.net*. Načteno z Researchgate: https://www.researchgate.net/publication/311512395_Fire_Resistance_of_Thermally_Modified_Spruce_Wood
- ČSN EN, 1.-1. (září 2019). ČSN EN 13 501-1. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň*.
- ČSN, 7. 0. (2016). *Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení*. Praha: Úřad pro normalizaci, požární bezpečnost.
- Dietemberger, M., & Hasburgh, L. (2016). Wood Products Thermal Degradation and Fire. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.*, 8.

-
- Fine civil engineering, s. (2021). *Fine civil engineering software*. Načteno z Fine: <https://www.fine.cz/>
- Gaff, M. Č. (2020). Flammability and chemical characteristics of thermally modified Intsia Bijunga (Merbau spp) wood treated with natural and synthetic fire retardants. Praha.
- Gaff, M. K. (10.. Březen 2019). *ScienceDirect*. Načteno z ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818330940>
- Gaff, M., & kol. (19.. Prosinec 2018). *ScienceDirect*. Načteno z ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818330940>
- Gaff, M., & kol., a. (2019). *Researchgate*. Načteno z <https://www.researchgate.net>: https://www.researchgate.net/profile/Miroslav_Gasparik/publication/329983770_The_effect_of_synthetic_and_natural_fire-retardants_on_burning_and_chemical_characteristics_of_thermally_modified_tectona_grandis_l_f_wood/links/5c274df4a6fdccfc706f915d/The
- Gardiner, & k. (2014). *The biology of reaction wood*. Heidelberg: Springer.
- Gašparík, M., & kol., a. (2017). *Bioresources*. Načteno z www.bioresources.com: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_12_4_8451_Gasparik_Flammability_Characteristics_Thermally_Oak
- Gérardin, P. (2. Prosinec 2016). New alternatives for wood preservation based on thermal and chemical modification of wood— a review. *SpringerLink*.
- Holan, J. (2006). *Dřevo v domácnosti - ochrana údržba, renovace*. Brno: Brno: ERA. 2006.
- Horský, D. (1987). *Hydrotermická úprava a ochrana dřeva*. Zvolen: Zvolen: Vysoká škola lesnická a dřevařská Zvolen. 1987.
- Jelle, P. B. (Říjen 2011). Tradiční, nejmodernější a budoucí tepelně izolační stavební materiály a řešení - Vlastnosti, požadavky a možnosti. *ScienceDirect*, stránky 2549-2563.
- Jirouš-Rajkovič, V., & Miklečic, J. (2018). *Weathering Resistance of Modified Wood – A Review*. Záhřeb: University of Zagreb, Faculty of Forestry.
- Kopos, Kolín a.s. (2020). www.kopos.cz. Načteno z [kopos](http://www.kopos.cz): <https://www.kopos.cz/cs/technicke-informace/tridy-reakce-na-ohen>
-

-
- Košík, M., Šurina, I., Lapčík, L., Růčka, I., & Reiser, V. (1983). *Termolytické reakce celulózy. I. Dehydratační reakce celulózy*. Bratislava: Katedra textilu, celulózy a papíru, Slovenská technická univerzita, CS-812 37 Bratislava.
- Král, P. H. (2005). *Kompoziční materiály na bázi dřeva- Dýhy a vrstvené masivní materiály*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- Kuklík, P. K. (2010). *Navrhování dřevěných konstrukcí příručka k ČSN EN 1995-1*. Informační centrum ČKAIT.
- Kupilík, V. (1997). *Střechy*. Praha: Stavební informační agentura.
- Kupilík, V. (1999). *Závady a živnost staveb*. Praha: Grada.
- Kupilík, V. (2006). *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada.
- Li, K., Zou, Y., Bourbigot, S., Ji, J., & Chen, X. (21. Zář 2020). Pressure effects on morphology of isotropic char layer, shrinkage, cracking and reduced heat transfer of wooden material. *ScienceDirect*.
- Lowden, L., & Hull, T. (09/03/2013. Zář 2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. *Fire Science Reviews*, stránky <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4>.
- Lukacevic, M., & Fussl, J. (14. květen 2014). Numerical simulation tool for wooden boards with a physically based approach to identify structural failure. *SpringerLink*, stránky <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0803-y>.
- Makovická, O. L. (2017). Retardácia drevovláknitých dosiek prírodným retrdérom. *17. medzinárodnej vedeckej konferencie, 14.-15. marec 2017, Bratislava*. Žilina: Žilina: Strix et SSŽP. Edition ESE-33.
- Netopilová, M. (1996). *Požárně technické charakteristiky dřeva, jejich úprava a testování*. Ostrava: Ostrava: Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- Nowak, T. P., Jasiénko, j., & Czepizak, D. (2013). Experimental tests and numerical analysis of historic bent timber elements reinforced with CFRP strips. *ScienceDirect*.
- Osvald, A. Š. (2013). *Modelový požiar dvojpodlažnej drevostavby*. Ostrava: Ostrava: Žilinská univerzita v Žilině vo vydavateľstve Šmíra-Print, s.r.o. Ostrava.

-
- Osvald, A., Krajčovičová, J., Mitterová, I., Orémusová, E., Balog, K., Netopilová, M., & Gašper, M. (2009). *Hodnotenie materiálov a konštrukcií pre potreby protipožiarnej ochrany*. Zvolen: Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009.
- Pabelina, K., Lumban, O. C., & Ramos, J. H. (Únor 2012). Plasma impregnation of wood with fire retardants. *Researchgate*.
- Paroc, O. C. (2020). *www.paroc.cz*. Načteno z Paroc: <https://www.paroc.cz/o-spolecnosti-paroc/o-spolecnosti-paroc>
- Pokorný, J. (Leden 2014). *Metodika pro specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství*. Načteno z researchgate.net:
https://www.researchgate.net/publication/293885800_Metodika_pro_specificke_posouzeni_vysoce_rizikovych_podminek_pozarni_bezpecnosti_s_vyuzitim_postupu_pozarniho_inzenyrstvi?channel=doi&linkId=56bcd20a08aed6959945bd27&showFulltext=true
- Požgaj, A. C. (1993). *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Bratislava: Príroda, 1993.
- Prokom, R&S s.r.o. (2013). *www.prokom.cz*. Načteno z Prokom R&S s.r.o.:
<https://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood>
- Ramage, M., Burridge, H. C., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D., . . . Sherman, O. (Únor 2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Researchgate*.
- Reinprecht, L. (2001). *Procesy degradácie dreva*. Zvolen: Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2001.
- Reinprecht, L. (2008). *Ochrana dreva*. Zvolen: Zvolen : Technická univerzita, 2008.
- Sadineni, B. S., Madala, S., & Boehm, F. R. (8. Říjen 2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *ScienceDirect*.
- Segov, O., Kushmaro, A., & Brenner, A. (5. Únor 2009). Environmental Impact of Flame Retardants (Persistence and Biodegradability). *MDPI Open Access Journals*, stránky 478-491.
- Shafizadeh, F. (30. Květen 1968). Pyrolysis and Combustion of Cellulosic Materials. *ScienceDirect*.
- Schaffer, E. (1973). Effect of pyrolytic temperatures on the longitudinal strength of dry Douglas-fir. *Journal of Testing and Evaluation*, 319-329.
-

-
- Svatoň, J. (2000). *Ochrana dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2000.
- Štroch, P. (2010). *Procesy hoření a vybuchu*. Žilina: Žilina: EDIS - vydavatelstvo ŽU, 2010.
- Využití dřeva, n. o. (2021). *Mezi stromy*. Načteno z Využití dřeva napříč odvětvími:
<https://www.mezistromy.cz/oblasti-vyuziti-dreva/vyuziti-dreva/odborny>
- Žák, J. R. (1998). *Ochrana dřeva ve stavbě: odporná příručka pro stavebníky, investory, projektanty a architekty*. Praha: ABF, 1998.