

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



**REAKCE NA OHEŇ TERMICKY MODIFIKOVANÉHO
DŘEVA – VLIV VYBRANÝCH ANTIPYRENŮ**

ČESKÁ ZEMĚDĚLSÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**REAKCE NA OHEŇ TERMICKY MODIFIKOVANÉHO
DŘEVA – VLIV VYBRANÝCH ANTIPYRENŮ**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program:	Dřevařství
Pracoviště (katedra/ústav):	Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Konzultant bakalářské práce:	Ing. Jiří Bouček

Praha 2021

Kristýna DUDOVÁ

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autorka práce: Kristýna Dudová
Studijní program: Dřevařství
Obor: Dřevařství
Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Garantující pracoviště: Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Jazyk práce: Čeština

Název práce: **Reakce na oheň termicky modifikovaného dřeva – vliv vybraných antipyrénů.**

Název anglicky: **Reaction to fire of thermally modified wood - influence of selected antipyrenes.**

Cíle práce: Základním cílem práce je ze-sumarizovat poznatky o vybraných požárních charakteristikách a jejich vlivu na rostlé a tepelně upravené dřevo ošetřené pomocí antipyrénů. Druhá část práce je zaměřena na experimentální ověření získaných poznatků a jejich rozšíření vykonaným a vyhodnocení testů na vybrané dřevině.

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

Doporučený rozsah práce: 70-80 stran

Klíčová slova: tepelně upravené dřevo, antipyrén

Doporučené zdroje informací:

1. Boonstra, M. J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B. F., and Kegel, E. V. (2007). "Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents," *Annals of Forest Science* 64(7), 679-690. DOI: 10.1051/forest: 2007048.
2. 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>
3. 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
4. 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.

5. Tewarson, A. (1994). "Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation," *Journal of Fire Sciences* 12(4), 329-356. DOI: 10.1177/073490419401200401
6. 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 2020/21 LS - FLD
obhajoby:

Konzultant: Ing. Jiří Bouček

Elektronicky schváleno: 27. 1. 2021

Ing. Radek Rinn
Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno: 27. 1. 2021

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.
Děkan

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Reakce na oheň termicky modifikovaného dřeva – vliv vybraných antipyrenů“ vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze, dne

.....

Kristýna Dudová

Poděkování

Chtěla bych touto cestou poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. a konzultantovi práce panu Ing. Jiřímu Boučkovi za jejich odborné vedení, konzultace, věnovaný čas a trpělivost. Dále bych chtěla poděkovat paní Bc. Šárce Helebrant, která mi pomohla s přeložením abstraktu do anglického jazyka. V neposlední řadě bych také ráda poděkovala své rodině za jejich podporu a trpělivost.

Abstrakt ve státním jazyce

Bakalářská práce se zabývá reakcí na oheň termicky modifikovaného modřínového (*Larix*) dřeva (thermowood), které je ošetřeno vybranými antipyreny. Výsledky získané na tělesech upravených termicky byly porovnány s výsledky tepelně neupravených těles. Termická úprava proběhla při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C. Následně byly tyto vzorky ošetřeny přírodním a syntetickým retardér hoření. V této bakalářské práci jsme zvolili jako přírodní retardant antipyren arabinogalaktán a jako syntetický retardér byl použit Flamgard, který je vyráběn společností Stachema a.s. ze Slovenska. Účinek tepelné modifikace a antipyrenů byl zjištěn podle charakteristik hoření, jako jsou maximální rychlost uvolňování tepla, čas při dosažení maximální rychlosti hoření, celkové teplo, hmotnost po ukončení testu, úbytek hmotnosti, rychlost úbytku hmotnosti.

Výsledky měření prokázaly vlivy retardérů hoření a termické modifikace na vybrané charakteristiky popisující reakci modřínového dřeva (*Larix*) na oheň a jeho zapalitelnost a na chemické složení dřeva. Z výsledků, které jsme získali měřením, vyplývá, že účinek retardérů je prokazatelný. Aplikací přírodního retardéru se snížily charakteristiky popisující reakci na oheň cca o 10 %, aplikací syntetického retardéru došlo ke snížení charakteristik cca o 30 %. V porovnání syntetického a přírodního retardéru hoření měl větší vliv na charakteristiky popisující reakci na oheň a zapalitelnost dřeva syntetický retardér, zejména u dřeva při teplotě termické modifikace 210 °C. Samotná termická úprava měla na charakteristiky statisticky významný vliv. Data chemického rozboru dřeva prokázala statistickou významnost teploty na obsah složek ve dřevě. Také se zjistilo, že se zvyšující teplotou termické modifikace se v modřínovém (*Larix*) dřevě snižuje obsah holocelulózy a hemicelulózy, naopak obsah extraktiv, ligninu a celulózy se zvyšuje.

Klíčová slova: termicky modifikované dřevo, antipyren, retardér hoření

Abstrakt v cizím jazyce

The Bachelor thesis is concerned with the reaction of fire resistance of thermally modified larch (*Larix*) wood (thermowood), which is treated with selected types of antipyrine coatings. Acquired results from thermally modified objects were contrasted with the results of thermally unprocessed objects. Wood samples were subjected to various thermal treatments at three temperatures: 160 °C, 180 °C and 210 °C. Subsequently, these samples were treated with natural and synthetic flame retardants. For this research, a natural-based arabinogalactan was used as antipyrine, and Flamgard (produced by Stachema a.s., The Slovak Republic) was used as a synthetic retardant. The effects of thermal modification and antipyrine were discovered based on individual properties of burning; the maximal speed of heat loss, the time needed for reaching the maximal speed of burning, total heat, weight after the end of the test, weight loss, speed of weight loss.

Specifically, the results of the measuring proved the influence of fire-retardants and thermal modification on chosen characteristics describing the reaction of larch wood (*Larix*) to fire and flammability, and chemical composition of wood. After summarizing the results obtained by measurement, it follows that the effect of retarders is demonstrable. The use of a natural retarder reduced the properties describing the reaction to the fire by about 10%, the use of a synthetic retarder reduced the properties by about 30%. When synthetic and natural fire-retardants were compared, synthetic fire-retardant had a greater effect on characteristics describing the reaction to fire and flammability, mainly when exposed to thermal modification of 210 °C. Also, the thermal modification itself substantially influenced the statistical characteristics. Data of the chemical analysis established the statistical importance of the temperature on the content of the wood constituents. Furthermore, it was detected that the higher the temperature of the thermal modification of larch wood, the lower the content of holocelluloses and hemicelluloses and, variously, the higher the content of extractives, lignins and cellulose.

Keywords: thermally modified wood, antipyrine, flame retardant

Obsah

Obsah	8
Seznam ilustrací	11
Seznam tabulek.....	12
Seznam zkratk a značek	14
Slovník termínů	15
Úvod.....	16
1 Cíl práce.....	18
2 Analýza literárních poznatků.....	19
2.1 DŘEVO – HOŘLAVÝ MATERIÁL	19
2.2 PROCES HOŘENÍ DŘEVA.....	19
2.2.1 Termický rozklad dřeva	21
2.2.2 Termolytická degradace.....	22
2.2.3 Pyrolytická degradace.....	23
2.3 HOŘLAVOST DŘEVA.....	24
2.3.1 Bod vzplanutí	24
2.3.2 Bod hoření.....	25
2.3.3 Bod zápalnosti.....	25
2.4 RYCHLOST ŠÍŘENÍ PLAMENE.....	25
2.5 FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA BĚHEM PŮSOBENÍ TEPLA.	26
2.5.1 Tepelná vodivost	27
2.5.2 Teplotní vodivost.....	27
2.5.3 Měrné teplo	28
2.5.4 Teplotní roztažnost.....	29
2.6 ODOLNOST MATERIÁLU	30
2.6.1 Třída hořlavosti.....	30
2.7 RETARDÉRY HOŘENÍ (ANTIPYRENY)	32
2.7.1 Fyzikální účinky antipyrenů	32

2.7.2 Chemické účinky antipyrenů	34
2.8 DRUHY RETARDÉRŮ HOŘENÍ (ANTIPYRENŮ)	35
2.8.1 Retardéry hoření na bázi anorganických solí.....	35
2.8.2 Intumescentní retardéry.....	37
2.8.3 Organické retardéry hoření	40
2.8.4 Použití retardérů hoření na rostlé dřevo a termicky modifikované dřevo	40
2.9 TERMICKÁ MODIFIKACE DŘEVA	41
2.9.1 Materiály používané na termickou úpravu	43
2.9.2 Výroba termicky modifikovaného dřeva	43
2.9.3 Vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.....	46
2.9.4 Použití termicky modifikovaného dřeva.....	49
3 METODIKA	50
4 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	51
4.1 Příprava zkušebních těles	51
4.2 Značení zkušebních těles	51
4.3 Vážení a měření zkušebních těles	51
4.4 Termická modifikace zkušebních těles.....	52
4.5 Fyzikální vlastnosti.....	53
4.6 Impregnace těles přírodním retardérem.....	54
4.7 Impregnace těles syntetickým retardérem	54
4.8 Měření těles na kónickém kalorimetru	55
4.9 Chemická analýza	58
4.10 Vyhodnocení výsledků	58
5 VÝSLEDKY A DISKUZE.....	60
5.1 Fyzikální vlastnosti.....	60
5.2 Chemická analýza	60
5.3 Maximální rychlost uvolňování tepla ($q(A, \max)$).....	64
5.4 Čas při maximální rychlosti uvolnění tepla $q(A, \max)$	67
5.5 Celkové teplo	70

5.6 Hmotnost po ukončení testu.....	73
5.7 Úbytek hmotnosti.....	76
5.8 Rychlost úbytku hmotnosti.....	79
6 Závěr.....	83
7 Seznam použité literatury.....	85
8 Přílohy.....	93

Seznam ilustrací

Obrázek 1 Fáze požáru	22
Obrázek 2 Vliv tepla, anorganických látek a přítomnosti kyslíku na průběh termické degradace dřeva.....	23
Obrázek 3 Schéma výroby termicky modifikovaného dřeva Thermoowood	44
Obrázek 4 Barevné změny termicky upraveného dřeva	47
Obrázek 5 Vážení vzorku.....	52
Obrázek 6 Průběh tepelné modifikace.....	53
Obrázek 7 Impregnace Arabinogalaktanem	54
Obrázek 8 Impregnace Flamfardem	55
Obrázek 9 Flamgard	55
Obrázek 10 Schéma kónického kalorimetru	56
Obrázek 11 Kónický kalorimetr	58
Obrázek 12 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty chemických komponentů.....	63
Obrázek 13 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty maximální rychlosti uvolňování tepla	66
Obrázek 14 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty času při maximální teplotě uvolňování tepla.....	69
Obrázek 15 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty celkového tepla	72
Obrázek 16 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty hmotností po ukončení testu.....	75
Obrázek 17 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty úbytku hmotnosti	78
Obrázek 18 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti	81
Obrázek 19 Spálený vzorek bez ochrany retardérem hoření	94
Obrázek 20 Spálený vzorek s ochranou syntetickým retardérem hoření - Flamgardem.....	94

Seznam tabulek

Tabulka 1 Obsah uhlíku a vodíku ve dřevinách	20
Tabulka 2 Odolnost vybraných dřevin proti vzplanutí při různých teplotách	25
Tabulka 3 Klasifikace dle indexu šíření plamene.....	26
Tabulka 4 Tepelně fyzikální charakteristiky vybraných dřevin	28
Tabulka 5 Měrné teplo při vlhkosti dřeva	29
Tabulka 6 Převodní tabulka pro srovnání tříd reakce na oheň se stupněm hořlavosti dle ČSN 33 2312 ed. 2	31
Tabulka 7 Přehled vlastností vybraných retardérů hoření.....	40
Tabulka 8 Procesy termické modifikace.....	53
Tabulka 9 Průměrné hodnoty hustoty vzorků před a po termické modifikaci modřínového dřeva s variačním koeficientem.....	60
Tabulka 10 Průměrné hodnoty chemické analýzy prvků	61
Tabulka 11 Jednofaktorová analýza rozptylu hodnotící účinek teploty na hodnoty změn chemických komponentů	61
Tabulka 12 Průměrné hodnoty maximální rychlosti uvolňování tepla termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem	64
Tabulka 13 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty maximální rychlosti uvolňování tepla	65
Tabulka 14 Průměrné hodnoty času při maximální rychlosti uvolňování tepla termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem	67
Tabulka 15 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty času při maximální rychlosti uvolňování tepla	68
Tabulka 16 Průměrné hodnoty celkového tepla termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem.....	70
Tabulka 17 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty celkového tepla	71
Tabulka 18 Průměrné hodnoty hmotnosti po ukončení testu termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem	73

Tabulka 19 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty hmotnosti po ukončení testu	74
Tabulka 20 Průměrné hodnoty úbytku hmotnosti termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem.....	76
Tabulka 21 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty úbytku hmotnosti	77
Tabulka 22 Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem.....	79
Tabulka 23 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti.....	79
Tabulka 24 Korelační koeficient v závislosti chemických složek dřeva na vybrané charakteristiky reakce na oheň.....	82
Tabulka 25 Porovnání efektu jednotlivých faktorů používaných v Duncanově testu u sledovaných charakteristik	95

Seznam zkratk a značek

tab.	tabulka
např.	například
obr.	obrázek
atd.	a tak dále
tj.	to je
tzv.	tak zvaný
mm	milimetr
min.	minuta
h	hodina
PVC	polyvinylchlorid
DTD	dřevotřísková deska
DVD	dřevovláknitá deska
EU	Evropská Unie
g	gram
NIS	Nábytkářský informační systém
VK	variační koeficient
TM	termická modifikace
s, S	sekunda
PUR	polyuretan
°C	stupně Celsia
K	Kelvin
T	teplota
kol.	kolektiv
min.	minimálně
PDP	překližka
ČSN	České technické normy
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci

Slovník termínů

Anizotropie jsou různé vlastnosti v různých směrech.

Degradace (znehodnocení) je zapříčiněna abiotickými a biotickými činiteli.

Nehomogenost je nerovnoměrná struktura.

Pyrolýza je postup, při kterém je materiál tepelně zpracován se zamezeným přístupem kyslíku, vzduchu a jiných plynných látek.

Úvod

Dřevo je již od nepaměti nejpotřebnější materiál, bez kterého se lidé neobejdou a potřebují ho. Byl a je i v dnešní době jedním z nejpoužívanějších materiálů pro výrobu nábytku, hudebních nástrojů, hraček, sportovních potřeb, truhlářských výrobků (schodů, dveří, oken atd.) i pro různé dřevěné konstrukce, dřevostavby a další. V historii staveb bylo dřevo prvním a nejdůležitějším stavebním materiálem pro nosné konstrukce. V posledních letech se zpracovává i méně hodnotné dřevo a dřevní odpad (např. dřevotřískové desky, dřevovláknité desky), a to z ekologických důvodů. Dřevo je nejnámější materiál, který má spoustu kladných vlastností, najdou se však i vlastnosti záporné (Radkau, 2012).

Dřevo se běžně kvalifikuje jako přírodní udržitelný zdroj, je tedy známé svou dostupností a obnovitelností. Vyznačuje se také dobrou opracovatelností. Díky dobré manipulaci se snadno spojuje s dalšími materiály. Vlastnosti dřeva jsou spojeny s jeho anizotropními vlastnostmi. Vyniká dobrými tepelně izolačními vlastnostmi a má schopnost tlumení vibrací. Mezi další výhody patří také snadné tvarování. Naopak mezi záporné vlastnosti dřeva patří jeho nerovnoměrná struktura (nehomogenost), různé vlastnosti dřeva v různých směrech (anizotropie), bobtnání a sesychání. Dále vlivem působení biotických činitelů (dřevozbarvující houby, dřevokazný hmyz, plísně atd.) degraduje a podléhá povětrnostním vlivům. Musíme se tedy snažit dřevo chránit, chemicky či konstrukčně, před prostředím, kde tyto negativní vlivy působí (Asdrubali et al., 2017).

Nás bude ale v tomto případě zajímat odolnost dřeva proti abiotickému činiteli (termické degradaci), tedy odolnost dřeva vůči jeho hoření. Během požáru vznikne na povrchu dřeva ohořelá a zuhelnatělá vrstva, která zpomaluje hoření a díky izolačním vlastnostem chrání nepoškozené dřevo a neztrácí své mechanické vlastnosti. Odolnost proti požáru je dlouho zkoumána a dnes můžeme zápalnost i hoření dřeva regulovat a ovládat. (Babrauskas and Grayson, 1990).

Zabýváme se tedy využitím retardérů hoření neboli antipyrenů, které nanesením na dřevo přispívají k jeho ochraně. V dnešní době se používají přírodní nebo syntetické retardéry. Ze syntetických antipyrenů se nejčastěji používá Flamgard (protipožární zpěnitelná hmota k ochraně dřevěných konstrukcí), který vyrábí Stachema a.s. ze Slovenska. K porovnání se syntetickým retardérem jsme použili přírodní antipyren, který

má hlavní složku Arabinogalaktán – získává se ze sibiřského smrku nebo z modřínu (*Larix*).

V této práci se věnujeme protipožární odolnosti termicky modifikovaného dřeva, které je díky jeho úpravě odolnější vůči negativním vlastnostem (odolává více povětrnostním vlivům a biotickým škůdcům). Práce shrnuje poznatky o procesu hoření dřeva, které jsou získávány pomocí kónického kalorimetru, a porovnává vliv použití syntetického a přírodního retardéru. Ty jsou ještě porovnávány s neošetřeným termicky modifikovaným dřevem.

1 Cíl práce

Prvním cílem bakalářské práce „Reakce na oheň termicky modifikovaného dřeva – vliv vybraných antipyrenů“ je analýza literárních poznatků. Analýza se zabývá problematikou o vlastnostech a druzích termicky modifikovaného dřeva. Dále se zaměřuje na poznatky o syntetických a přírodních antipyrenech, jejich vlastnostech, způsobu použití a druzích, dále také o procesu hoření a hořlavosti dřeva a jeho vlastnostech během působení tepla.

Dalším cílem je ověřit účinek teploty termické modifikace na chemické složení dřeva. Dále je cílem zjistit vliv teploty termické modifikace a vybraného retardéru hoření (syntetický či přírodní) na charakteristiky popisující reakci materiálů na oheň a zapalitelnost (začátek trvalého plamene, maximální rychlost uvolňování tepla, celkové teplo, hmotnost po ukončení testu, úbytek hmotnosti a rychlost úbytku hmotnosti, čas při dosažení maximální rychlosti hoření) podle normy ISO 5660-1 pomocí kónického kalorimetru, a poté výsledky staticky vyhodnotit a porovnat termicky modifikované dřevo upravené syntetickým a přírodním retardérem hoření s termicky modifikovaným dřevem bez aplikace antipyrenu.

V konečné části se hodnotí výsledky, kde na sebe vzájemně působí teplota termicky modifikovaného dřeva s retardérem hoření na sledované charakteristiky a teplota termicky modifikovaného dřeva s retardérem hoření na změny chemického složení na vybrané charakteristiky.

2 Analýza literárních poznatků

2.1 DŘEVO – HOŘLAVÝ MATERIÁL

Dřevo bylo již v minulosti využíváno pro interiérové a exteriérové účely (nábytek, stavební účely). Je to přírodní materiál s vynikajícími vlastnostmi a je vhodný pro mnohostranné využití. Výhodami jsou hlavně obnovitelnost a dostupnost, dále také snadná zpracovatelnost a estetický vzhled (textury, barevnost). I přes tyto vlastnosti má také určité nevýhody (Gašpařík a kol. 2017). Mezi ně se řadí např. nízká odolnost proti biologickým činitelům (hmyz, houby, plísně), ale také změny mechanických a fyzikálních vlastností a vysoká hořlavost. A pro jeho dlouhodobou účinnost je tedy důležité mu věnovat větší péči. Z toho důvodu se vylepšují jeho vlastnosti pomocí různých modifikačních metod, jako jsou např.: impregnace, chemická nebo tepelná úprava (Sandak et al., 2017; Gašpařík a kol., 2017).

Dřevo (materiál organického původu) je hořlavé, ale těžko zápalné. Masivní dřevo vzdoruje požáru déle než některé nehořlavé materiály, např. ocel při vysokých teplotách (500°C) oproti dřevu (to si částečně zachovává únosnost) náhle ztrácí pevnost. Hašení dřevěných konstrukcí je obtížné a může dojít k opakovanému vzplanutí. Požár i jeho hašení dřevo velmi znehodnotí (Šefců a kol., 2002).

Vlastnosti dřeva se vlivem požáru mění:

- profil dřevěného prvku se ohořením zmenší, stále má pod zuhelnatěnou vrstvou stejné mechanické vlastnosti,
- spálené dřevo se nesnadno zapaluje,
- ohořelý povrch chrání před vlhkostí a napadením,

(Šefců a kol., 2002).

Jelikož je dřevo hořlavý materiál, dochází u něj k procesu termického rozkladu dřeva.

2.2 PROCES HOŘENÍ DŘEVA

Každý druh dřeva reaguje na zvýšení teploty jinak. Hoření dřeva je exotermický rozklad vazeb chemických komponentů dřeva. Příčinou hoření jsou hořlavé látky v přítomnosti kyslíku. Dřevo obsahuje asi 49 až 51 % uhlíku, 43 až 44 % dusíku a 6 až 7 % vodíku. Obsah těchto složek se mění v závislosti na druhu dřeviny (viz. tab. 1).

Tabulka 1 Obsah uhlíku a vodíku ve dřevinách

Dřevina	Uhlík C [%]	Vodík H [%]
Javor velkolistý (<i>Acer macrophyllum</i>)	46,64 ± 0,27	8,52 ± 0,21
Olše červená (<i>Alnus rubra</i>)	47,70 ± 0,12	7,99 ± 0,19
Bříza papírovitá (<i>Betula papyrifera</i>)	48,37 ± 0,21	7,87 ± 0,26
Buk velkolistý (<i>Fagus grandifolia</i>)	46,60 ± 0,39	6,09 ± 0,87
Topol osikový (<i>Populus tremuloides</i>)	47,09 ± 0,75	6,28 ± 1,14
Dub bílý (<i>Quercus alba</i>)	49,57 ± 0,22	7,64 ± 0,25
Vrba (<i>Salix</i>)	49,05 ± 0,58	8,26 ± 0,28
Lípa americká (<i>Tilia americana</i>)	46,43 ± 0,17	6,48 ± 0,61
Jilm (<i>Ulmus</i>)	46,32 ± 0,27	5,67 ± 0,26
Jedle balzámová (<i>Abies balsamea</i>)	50,08 ± 0,45	7,69 ± 0,35
Modřín americký (<i>Larix laricina</i>)	47,21 ± 0,35	7,90 ± 0,18
Modřín západní (<i>Larix occidentalis</i>)	47,60 ± 0,21	7,90 ± 0,20
Smrk sivý (<i>Picea glauca</i>)	50,39 ± 0,45	7,95 ± 0,26
Borovice vejmutovka (<i>Pinus strobus</i>)	49,74 ± 0,16	8,25 ± 0,25
Douglaska tisolistá (<i>Pseudotsuga menziesii</i>)	50,50 ± 0,36	8,25 ± 0,10
Jedlovec západní (<i>Tsuga heterophylla</i>)	50,60 ± 0,45	7,85 ± 0,33

(Zdroj: Lamlon and Savidge, 2003)

Kyslík a vodík jsou velmi hořlavé látky. Uvnitř dřeva je uloženo díky fotosyntéze velké množství energie a v průběhu hoření se mění v teplo. Tato energie se do dřeva ukládá pomocí fotosyntézy, přesněji to jsou látky, které se díky fotosyntéze tvoří. Z vody a oxidu uhličitého se tvoří celulóza (40-50 %), která se mění na polysacharidy a lignin (15-35 %) pomocí endotermické reakce (Reinprecht, 2008; Barnett et. al., 2003).

Dřevo v porovnání s jinými materiály reaguje na oheň malou tepelnou roztažností (tj. změna rozměrů vlivem teploty). Při tepelném namáhání dochází zároveň k sušení dřeva, což vede ke vzniku trhlin a napětí (tahové napětí) (Javořík, 1999).

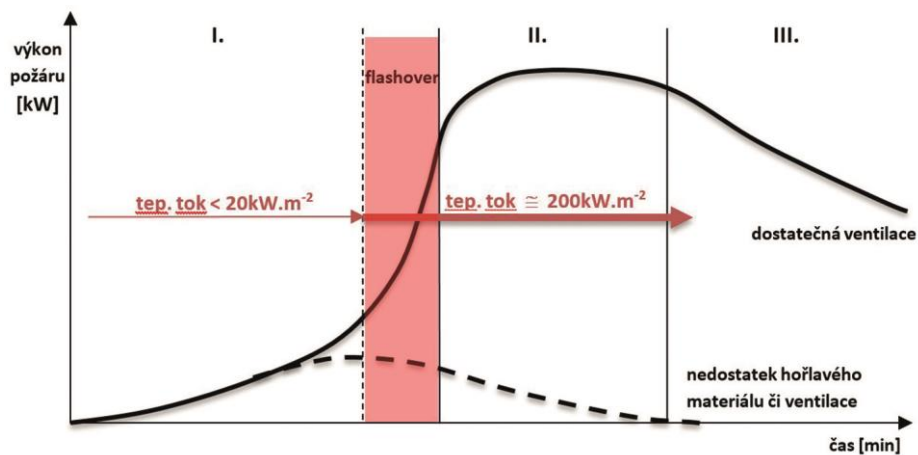
2.2.1 Termický rozklad dřeva

Termický rozklad dřeva je chemická reakce, která se skládá z několika fází (dehydratace, depolymerace a jiné). Tyto reakce se při teplotách pod 66 °C neuskutečňují. Dřevo začíná ztrácet svou hmotnost při teplotě 97 °C, je to způsobeno odpařováním vody volné z vnitřních prostor dřeva. K narušení stavebních složek dochází, až když je teplota nad 150 °C.

V první fázi dochází k zapálení dřeva. Dochází k působení teplot od 150 do 200 °C. Při tomto procesu nastává degradace, přesněji dehydratace polysacharidů (hemicelulózy, celulózy). V této fázi dochází k vývoji nehořlavých plynů, zejména vodní páry (se stopami oxidu uhličitého, kyseliny mravenčí a octové), a odpařování vody vázané (Beall and Eickner, 1970). Rychlost odpařování závisí hlavně na teplotě. Důsledkem vysoké teploty mění dřevo svou barvu do hnědých odstínů. Nastává pokles mechanických vlastností dřeva (hlavně houževnatosti, tj. že dřevo odolává dynamickému či rázovému namáhání) (Torres et. al., 2011).

Při druhé fázi dochází k uvolňování tepla. Mezi teplotami 200 až 280 °C nastává depolymerace neboli pomalá pyrolýza polysacharidů a ligninu. Vytváří se zde stejné plyny jako u první fáze, ale s nižším obsahem vodní páry a trochou oxidu uhelnatého. Při teplotách od 280 do 400 °C nastává tzv. flashover (neboli celkové vzplanutí), kde dochází k rychlému stoupaní teploty. V krátkém časovém intervalu teplota rychle stoupne na 400 až 600 °C a vyvolá vznícení maximálního množství hořlavých plynů (vodík, metan, oxid uhelnatý atd.). Výrazně se snižuje pevnost dřeva (Reinprecht, 2008; Kupilík, 2006; Beall and Eickner, 1970).

Ve třetí fázi je požár plně rozvinut a teplota ohně je nejvyšší a drží se v konstantní hodnotě. Při poslední fázi oheň dohořívá, teplota pozvolně klesá až do úplného vyhasnutí. Výsledkem termické degradace je dřevěné uhlí (Moritz et al., 2012).



I. Vzpanutí, II. Plně rozvinutá požár, III. Dohořívání.

Obrázek 1 Fáze požáru

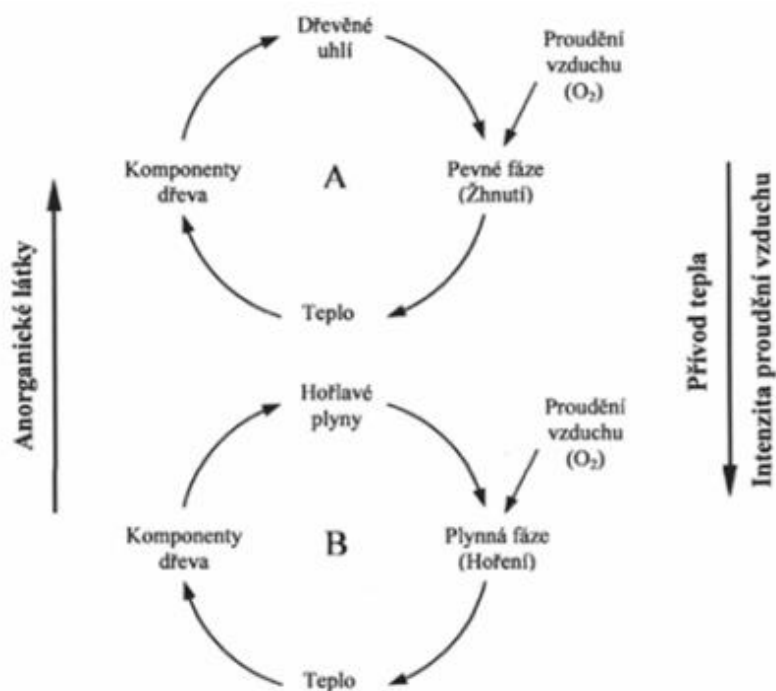
(Zdroj: Kopecký a kol., 2017)

2.2.2 Termolytická degradace

Termolytické degradace se uskutečňují za zvýšené teploty dřeva. Tyto reakce jsou heterolytického a homolytického charakteru, při kterých vznikají různé produkty a meziprodukty. Heterolytická reakce (iontová) spočívá v asymetrickém štěpení vazby a vznikají při ní ionty. U homolytické reakce se štěpí vazba symetricky a vznikají při ní radikály (to jsou částice s nepárovým elektronem) (Uralyx, 2014; Kawamoto, 2017). Průběh termolytické reakce je především ovlivněn:

- intenzitou tepelné energie,
- typem použitých příměsí (aditiva – biocidy, retardéry hoření atd.),
- prouděním kyslíku ke dřevu (viz. obr. 2),

(Reinprecht, 2001).



A – upřednostnění tvorby karbonových zbytků
B – upřednostnění tvorby lehce hořlavých plynů

Obrázek 2 Vliv tepla, anorganických látek a přítomnosti kyslíku na průběh termické degradace dřeva

(Zdroj: Reinprecht, 2001)

Termolytická degradace spočívá v přechodu elektronů v kovalentních vazbách ligninu a polysacharidů ze základního stavu do excitovaného stavu. Poté probíhá štěpení vazeb a vznikají vysoce reaktivní radikály. Vazby také mohou za vzniku uvolněné energie vstupovat do reakce s dalšími látkami (Schutyser et al, 2018).

2.2.3 Pyrolytická degradace

Pyrolýza je složitý proces, při kterém nastává bez přístupu kyslíku a působením tepla štěpení vazby v molekulách na molekuly, které mají nižší molekulovou hmotností. Pyrolýza probíhá při teplotách mezi 280 a 500 °C. Produkuje se při ní velké množství

dehtu a plynů, které obsahují oxid uhličitý. Výroba plynů mezi teplotami 500 a 700 °C je malá a obsahuje vodík (Bhatia, 2014). Pyrolýza se dělí na tři stupně:

- nízkoteplotní < 500 °C,
 - středně teplotní 500–800 °C,
 - vysokoteplotní > 800 °C,
- (Reinprecht, 2001).

2.3 HOŘLAVOST DŘEVA

Hořlavost dřeva je spojena s přenosem tepla ve dřevě. I když jde o hořlavý materiál, tak dřevo někdy překoná i nehořlavé kovy (např. ocel). Chemické složení dřeva velice ovlivňuje jeho hořlavost. Chemické složky se hodně liší rozdílnou výhřevností a odolností termického rozkladu (pyrolýza, tj. proces, při kterém se rozkládá dřevo bez dostupnosti kyslíku) (Zámostný a Kurc, 2011; Anonymus, 2009). Vůči termickému rozkladu jsou nejméně odolné hemicelulózy, ty se rozkládají při teplotách od 170 do 240 °C. Celulóza je oproti hemicelulózám vůči působení tepla odolnější. Úplný rozklad celulózy nastává při teplotách 250 až 350 °C. Nejodolnější složkou vůči působení tepla je lignin. Rozklad ligninu probíhá v intervalu od 300 do 400 °C.

První změnou předcházející hoření se týká akumulace tepla, které je dodáno zdrojem nebo nastává bio oxidační, termo oxidační nebo chemickou reakcí. Zprvu dochází k dehydrataci, a to při teplotě nad 100 °C. Při působení teplot od 130 do 150 °C nastává rozklad dřeva. Intenzivní rozklad, při kterém se uvolňuje velké množství plynů, vzniká při teplotním intervalu od 180 do 195 °C. Exotermický rozklad dřeva začíná při teplotách 270 až 280 °C.

Hořlavost charakterizujeme bodem vzplanutí, hoření a zápalnosti (Fox et al., 2008; Anonymus, 2009).

2.3.1 Bod vzplanutí

Bod vzplanutí je teplota, díky které se při termickém rozkladu vyvine tolik plynů (dusík, kyslík), které ve směsi se vzduchem při přiblížení plamene vzplanou a opět zhasnou. Vzplanutí vznikne při teplotách 180 až 275 °C. Záleží na druhu dřeva, jeho vlhkosti, hustotě a také na chemickém složení (Horáček, 1998).

2.3.2 Bod hoření

Bodem hoření se označuje nejnižší teplota dřeva, při které se při zahřívání vyprodukuje tolik plynů, které při přiblížení plaménku vzplanou a po oddálení stále hoří, nejméně 5 sekund. Tento bod se pohybuje v rozmezí od 260 do 290 °C (Horáček, 1998).

2.3.3 Bod zápalnosti

Je to teplota, při které se plyny při dodání kyslíku samovolně vznítí. Jedná se o teplotu mezi 330 až 520 °C (Horáček, 1998; Anonymus, 2009).

Tabulka 2 Odolnost vybraných dřevin proti vzplanutí při různých teplotách

Teplota (°C)	Doba potřebná pro splanutí (min.)			
	Smrk	Modřín	Lípa	Dub
180	40,0	30,8	-	20,0
200	19,6	25,0	14,5	13,3
225	8,3	17,0	9,6	8,1
250	5,3	9,5	6,0	4,7
300	2,1	3,5	1,6	1,6
350	1,0	1,5	1,2	1,2
400	0,3	0,5	0,3	0,5

(Zdroj: NIS, 2017)

Hoření dřeva je také závislé na rychlosti šíření plamene. Čím více se plamen šíří, tím rychleji shoří.

2.4 RYCHLOST ŠÍŘENÍ PLAMENE

Rychlost šíření plamene je závislá zejména na druhu dřeviny, hustotě anatomické stavbě dřeva, kvalitě povrchu a vlhkosti dřeva (Aseeva et al., 2014). Mezi další faktory během hoření také patří usazování uhlíkové vrstvy na dřevě. Díky uhlíkové vrstvě se snižuje rychlost šíření rozkladu dřeva a zpomaluje postup ohně dřevěným materiálem.

Jeho rychlost se uvádí mezi 30 a 60 mm⁻¹ za hodinu a ztrácí svou pevnost. Dřevo začne hořet, když se pod touto vrstvou zahřeje na teplotu (130–150 °C), která je potřebná k rozkladu.

Na rychlost šíření plamene má nejvyšší vliv složení dřeva, to kvůli jeho pórovitosti a velikosti makrokapilár a mikrokapilár. Kapiláry ovlivňují přenos kyslíku do vnitřku dřeva, a také odvádění plynných produktů pyrolýzy. Dřevo s vyšším procentuálním podílem celulózy je hořlavější než dřevo s nižším podílem (Popescu et al. 2011).

Další faktor, který ovlivňuje šíření plamene, je kvalita povrchu. Myslí se tím jeho drsnost, která závisí na stavbě dřeva. Čím je povrch drsnější, tím rychleji dochází ke vznícení. A jelikož hladký povrch tepelnou energii odráží, tak je hůře zápalný než povrch drsný (Matovič, 1993; Horáček, 1998; Mendelu, 2017).

U šíření plamene je také důležitý index, který se značí i_s . Charakterizujeme ho rychlostí šíření plamene v milimetrech za minutu po povrchu dřevěného materiálu. Dřevo klasifikujeme do tříd dle rychlosti šíření plamene (Ženatý, 2018).

Tabulka 3 Klasifikace dle indexu šíření plamene

Klasifikace šíření plamene	Index šíření plamene [mm/min]
Třída I (nebo A)	0-25
Třída II (nebo B)	26-75
Třída III (nebo C)	76-200

(Zdroj: Ženatý, 2018)

2.5 FYZIKÁLNÍ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI DŘEVA BĚHEM PŮSOBENÍ TEPLA

Rychlost šíření plamene je zejména závislá na velikosti, tvaru a hustotě částic, anatomické stavbě dřeva, kvalitě povrchu, vlhkosti dřeva (Karinkanta et al., 2018). Mezi další faktory také patří uhelnatění povrchu dřeva při hoření. Jeho rychlost se uvádí mezi 30 a 60 mm za hodinu a ztrácí svou pevnost. Díky své zvýšené odolnosti postupu tepla uhelnatění při hoření zpomaluje postup ohně dřevěným materiálem. Dřevo začne hořet, když se pod touto vrstvou zahřeje na teplotu, která je potřebná k termickému rozkladu.

2.5.1 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost se zvyšuje s rostoucí teplotou, vlhkostí a hustotou. Díky přenosu tepla ve dřevě dokážeme předvídat rychlost teplotního spádu a rozložení teplot v tělese. Přenos tepla ve dřevě se teoreticky uskutečňuje ve třech základních formách – vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí), sáláním (radiací). Přenos tepla se zvyšuje při sušení dřeva a posuzování tepelně-izolačních vlastností. Tepelný tok lze popsat dvěma způsoby, a to jako stacionární a nestacionární děj. Při vedení tepla stacionárním dějem je teplotní spád konstantní, není-li však konstantní, jedná se o nestacionární přenos tepla (Horáček, 1998; Anonymus, 2009; Mendelu, 2017).

2.5.2 Teplotní vodivost

Tato vlastnost vyjadřuje vyrovnávání teplotních rozdílů materiálu. Je dána koeficientem teplotní vodivosti, který je vyjádřen vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c * \rho_0} \quad (1)$$

kde: a – součinitel teplotní vodivosti [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],
 λ – součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 c – měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ – hustota dřeva [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Teplotní vodivost je závislá na hustotě dřeva. Koeficient klesá s rostoucí hustotou a obsahem vody (Sonderegger and Niemz, 2009). Dřeva, která mají nižší hustotu, ovlivňují zvýšené hodnoty teplotní vodivosti, a to díky velkému obsahu vzduchu průřezu dřeva. Dále také závisí na vlhkosti dřeva, ta snižuje hodnoty teplotní vodivosti nad mezí hygroskopicity (Matovič, 1993).

Záleží také na anizotropii dřeva, projevuje se rozdílnou tepelnou a teplotní vodivostí v příčném a podélném směru.

Tabulka 4 Tepelně fyzikální charakteristiky vybraných dřevin

Druh dřeva	Směr	T (°C)	w (%)	ρ (kg.m ⁻³)	c (kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	10 ⁷ a (m ² .s ⁻¹)
smrk	l	20	12	390-467	1,55-2,28	0,229 -0,339	3,77-4,95
	r	20	12	390-467	1,55-2,28	0,133-0,157	1,56-1,74
	t	20	12	390-467	1,55-2,28	0,113-0,132	1,49-1,52
javor	l	20	10	608	1,92	0,300	2,43
	r	20	10	608	1,92	0,180	1,40
	t	20	10	608	1,92	0,180	1,38
jasan	l	20	10	702	1,92	0,360	2,43
	r	20	10	702	1,92	0,180	1,20
	t	20	10	702	1,92	0,170	1,16

l, r, t – směry podélný, radiální, tangenciální; T – teplota; w – vlhkost; ρ – hustota; c – měrné teplo; λ – tepelná vodivost; a – teplotní vodivost.

(Zdroj: Mendelu, 2017)

2.5.3 Měrné teplo

Každá látka dokáže teplo akumulovat, tak to je i u dřeva. Veličinou měrného tepla je *c*. Veličina *c* je dána množstvím tepla, které se musí ohřát na jednotkovou hmotnost dřeva o 1 °K.

$$c = \frac{Q}{m * \Delta T} \quad (2)$$

kde: *c* – měrné teplo [J.kg⁻¹.K⁻¹]

Q – množství tepla [J]

ΔT – teplotní rozdíl [°K]

Absolutně suché dřevo o teplotě 0 °C má průměrnou hodnotu měrného tepla 1,62.

Tabulka 5 Měrné teplo při vlhkosti dřeva

Druh dřeviny	Měrné teplo dřeva c ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) při vlhkosti dřeva w					
	0 %	5 %	10 %	20 %	30 %	100 %
smrk	1,35	1,51	1,63	1,80	2,18	2,80
borovice	1,41	1,54	1,66	1,87	2,33	2,80
dub	1,45	1,59	1,67	1,91	2,37	2,79
buk	1,46	1,60	1,71	1,92	2,41	2,83

(Zdroj: Mendelu, 2017)

2.5.4 Teplotní roztažnost

Při navýšení teploty tělesa se zvyšuje energie jeho molekul, a také rozměry tělesa. Koeficient teplotní roztažnosti α se definuje podobně jako koeficient bobtnání a sesychání. Vyjadřuje se podílem změny nového rozměru a původního rozměru, které závisí na teplotě o 1 K.

$$\alpha_i = \frac{l_T - l_0}{l_0 \Delta T} \quad (3)$$

kde: α_i – koeficient teplotní roztažnosti v i – směru [$\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$]

l_0 – počáteční rozměr [m]

l_T – rozměr po změně teploty ΔT [m]

Důsledkem anizotropie dřeva jsou poměry mezi jednotlivými směry rozdílné, $\alpha_T : \alpha_R : \alpha_L = 15 : 10 : 1$. Jsou podobné jako u sesychání či bobtnání, ale hodnoty jsou 10000x větší než u teplotní roztažnosti. Jelikož hodnoty jsou nízké, jsou v praxi zanedbatelné (Mendelu, 2017).

2.6 ODOLNOST MATERIÁLU

2.6.1 Třídy hořlavosti

Třída hořlavosti A1

Do této kategorie patří nehořlavé materiály, nepřispívající k rozvoji ohně. Při splnění těchto podmínek jsou materiály vyhovující všem požadavkům pro třídy nižší. Nehořlavé materiály jsou například beton, kámen, sklo, tavený čedič a desky ze skleněných vláken aj.

Za nehořlavé látky jsou považovány všechny materiály, které nehoří, neuhelnatí ani nedoutnají, a to i za působení ohně a vysokých teplot za atmosférického tlaku (Ptáček, 2009).

Třída hořlavosti A2

Materiály třídy hořlavosti A2 nepřispívají pro rozvoj požáru. Zařazují se sem materiály nesnadno hořlavé (desky z minerálních vláken, houževnatý a neměkčený PVC, sádkartonové desky, aj.). Za nesnadno hořlavé látky považujeme všechny materiály, které špatně hoří, neuhelnatí ani nedoutnají, a to i za působení ohně a vysokých teplot za atmosférického tlaku (Fowler, 1971).

Třída hořlavosti B

Kritéria jsou stejná jako u třídy C, má ale přísnější požadavky. Do skupiny třídy hořlavost B jsou zařazeny těžce hořlavé materiály (PDP klasická i vodovzdorná, listnaté dřeviny – dub, buk) (Ptáček, 2009).

Třída hořlavosti C

Vyhovuje přísnějším požadavkům, než třída D. Řadíme sem materiály, které vykazují omezené rozšíření plamene při působení tepla. Jsou to např. DTD, DVD, pazdeřové desky, korkové desky a jehličnany (modřín, smrk, borovice a jedle) (Ptáček, 2009).

Třída hořlavosti D

Výrobky třídy hořlavosti D mají stejná kritéria jako u třídy E. Materiály, které odpovídají třídě hořlavosti D, odolávají malému plamenu po delší časový interval bez znatelného rozšíření plamene. Odolávají také působení tepla od hořícího předmětu za podstatného zpoždění a omezení uvolňování tepla (Izolace-info, 2014).

Třída hořlavosti E

Třída hořlavosti E je nejnižší stupeň hořlavosti, kdy je materiál schopen odolávat mírnému plamenu po krátkou dobu bez jakéhokoli rozšíření. Mezi materiály třídy hořlavosti E řadíme např. DVD (Hobra), laminované DTD a plasty (pěny, pryže, PUR, polystyren a polyethylen) (Ptáček, 2009; Izolace-info, 2014).

Třída hořlavosti F

Zde zařazujeme materiály, které nelze zařadit do žádné ze tříd A1, A2, B, C, D či E. Jsou tedy velmi hořlavé (Izolace-info, 2014).

Tabulka 6 Převodní tabulka pro srovnání tříd reakce na oheň se stupněm hořlavosti dle ČSN 33 2312 ed. 2

Třída reakce na oheň	Stupeň hořlavosti
A1, A2	A
B	B
C	C1
D	C2
E, F	C3

(Zdroj: Kopus, 2021)

2.7 RETARDÉRY HOŘENÍ (ANTIPIRENY)

Jedny z retardérů hoření jsou antipireny, a to jsou látky, kterými se snižuje hořlavost, zamezuje se šíření plamene a chrání dřevo proti sálavému teplu. Zvyšuje se jimi tedy požární odolnost (Osvald a Osvaldová, 2011). Ke zpomalování hoření dřeva dochází fyzikálními nebo chemickými způsoby:

- zamezuje přístupu kyslíku,
- snižuje koncentraci kyslíku,
- tepelně izolují dřevní substanci,
- aktivují endotermickou reakci,
- brání žhavému dřevěnému uhlí, aby se znovu zapálila a pokračovala v požáru, (Reinprecht, 2008).

2.7.1 Fyzikální účinky antipyrénů

Vliv těchto účinků tkví v regulaci následujících jevů.

Redukce přenosu tepla

Díky látce proti hoření dřeva se přenos kyslíku do dřeva a přenos hořlavých plynů ven ze dřeva omezí. Na povrchu dřeva dochází k tvorbě tavitelné látky na bázi křemičitanu draselného K_2SiO_3 a křemičitanu sodného Na_2SiO_3 , v dnešní době se jedná hlavně o intumescentní látky neboli pěnotvorné látky.

Mezi vrstvou buněčných stěn (S_3) a lumeny se tvoří látky typu boritanů – kyselina boritá H_3BO_3 a tetraboritan sodný $Na_2B_4O_7$. Během aktivní pyrolýzy tvoří boritany taveninovou glazuru a ve formě vodního roztoku pronikají více do dřeva.

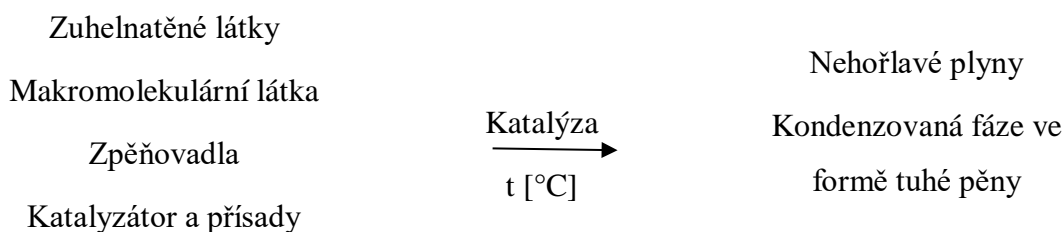
Intenzita přenosu kyslíku se na povrchu dřeva a mezi lumeny a vrstvou buněčných stěn (S_3) ve směru k dřevní substanci snižuje. Také se snižuje intenzita přenosu hořlavých plynů ve směru ke kyslíku na povrch dřeva, jsou to například alkoholy, oxid uhelnatý, metan, aldehydy apod. (Reinprecht, 2008; Bučko a Osvald, 1998).

Redukce přenosu tepla

Ke snížení intenzity přenosu tepla, které jde od vnějšího termického zdroje ke dřevu, dochází, když se vnější povrch dřeva obalí tepelně izolačními vrstvami (intumescentní vrstvy, zuhelnatěné vrstvy dřeva).

Tepelně izolační intumescentní vrstvy se vytváří následkem ohřevu teplotou nad 150 °C z nátěrů či fólií, při expanzním faktoru (tloušťka pěny ve vztahu k tloušťce původního nátěru nebo fólií) 1:50. Při této teplotě se na povrchu dřeva vytváří nehořlavá, silná, tepelně izolační, mikroporézní pěnová vrstva. Ta odolává ohni až 30 minut. Vlivem zvýšené teploty se z ní stává pevná stabilní pěna. U nátěru o tloušťce 0,2 mm se během termického zatížení vytváří o tloušťce 10 mm izolační vrstva (Bučko a Osvald, 1998; Reinprecht, 2008).

Pěnotvorné nátěry nebo fólie spočívají ve spojení fyzikálních a chemických dějů):



- Makromolekulární látka: Tyto látky mohou přecházet do taveniny. Po následném zpěnění se dále stávají tuhým uhlíkovým skeletem. Jsou na bázi polyamidů, polyvinylacetátů, polyalkoholů a polyaminofosfátů.
- Katalyzátor: Je látka, která reguluje přeměnu tenké vrstvy protipožárního nátěru na tuhou pěnu. Iniciuje rozklad zpěňovadla v době vzniku taveniny. Katalyzátor snižuje dobu či teplotu hoření a hořlavost tuhé pěny.
- Zpěňovadla: Tyto látky obsahují dusík, tj. melamin, močovina, dikyandiamid, metylmočovina aj. Rozkládají a uvolňují nehořlavý plynný amoniak NH₃ (za přítomnosti katalyzátoru), a to díky teplotám nad 150 °C. Mohou se použít i další látky, ze kterých se uvolňují jiné typy nehořlavých látek. Nehořlavými plyny se napěňuje makromolekulární složka nátěru, která po navýšení teploty přejde do taveniny.
- Přísady: Přísady jsou látky, které zajišťují správnou stabilitu nátěru, viskozitu, dobrou přilnavost k podkladu, trvanlivost, pružnost, světelnou stálost a barvu. Zvyšují také

pevnost tuhé pěny a zlepšují odolnost vůči biologickým škůdcům a povětrnostním podmínkám (Freitag and Stove, 2008; Reinprecht, 2008).

Zvýšená tepelná vodivost dřeva

Díky konstrukčním zásahům a modifikaci dřeva látkami zvyšující tepelnou vodivost dochází v dřevěných materiálech ke snížení akumulace tepla (Reinprecht, 2008).

Ředění hořlavých plynů

Během termického rozkladu dřeva se uvolňují hořlavé plyny. Neměly by se uvolňovat předčasně, ale až v okamžiku termického rozkladu dřeva (Zhao et al., 2019). Při dostatečném zředění hořlavých plynů se brání přístupu kyslíku a stávají se z nich plyny nehořlavé. Díky nehořlavým plynům je větší pravděpodobnost, že se molekuly hořlavých plynů přesunou z povrchu dřevěného materiálu až za zónu aktivní pyrolýzy bez reakce s kyslíkem, a to pomocí toku či difúze. Když se k povrchu dřeva dostává malé množství tepla, tak se požár vyvine v malé míře nebo vůbec (Reinprecht, 2008).

2.7.2 Chemické účinky antipyrenů

Cílem je snížení koncentrace kyslíku a regulace rozkladu dřeva a snížení tvorby hořlavých plynů.

Chemická vazba kyslíku

Bez kyslíku by dřevo nehořelo. Látky jsou oxidovány kyslíkem a snižují jeho koncentraci v aktivní pyrolýze. Brání také procesu hoření dřeva. Dříve se používaly látky (halogenidy), které se díky kyslíku oxidují do vyššího oxidačního stupně. Mezi ně patří bromidy a chloridy, ty s pomocí kyslíku postupně oxidují na bromistany a chloristany. (Reinprecht, 2008). Dnes jsou však v EU zakázané, protože jsou karcinogenní a teratogenní.

Karbonizování dřeva

Neboli katalytická dehydratace polysacharidů. Jedná se o reakci endotermickou (z hemicelulózy a celulózy se uvolňují molekuly vody) a stavební složky dřeva karbonizují.

Látky na bázi kyseliny fosforečné typu draselných, amonných, anorganických solí či jejich organických derivátů (např. triarylfosfáty) jsou urychlovány dehydratací polysacharidů. Omezují tvorbu hořlavých plynů. (Reinprecht, 2008; Bučko a Osvald, 1998).

2.8 DRUHY RETARDÉRŮ HOŘENÍ (ANTIPIRENU)

Mezi nejčastěji používané druhy retardérů patří retardéry na bázi anorganických solí a intumescentní (napěňovací) retardační přípravky, v menší míře se můžeme setkat také s organickými sloučeninami. Lze se setkat také s organickými antipyreny, avšak v menší míře (Bartošová a kol., 2019).

2.8.1 Retardéry hoření na bázi anorganických solí

Do této kategorie řadíme především síran amonný, fosforečnan amonný, chlorid amonný, kyselinu boritou, chloridy hořečnaté, vápenaté aj.

Díky těmto retardérům se dřevo ochlazuje (retardéry spotřebovávají teplo) a oddaluje se jeho vznícení. Jsou charakteristické nehořlavými plyny (amoniak, dusík, oxid uhličitý), dochází k zředění hořlavých plynů a na povrchu dřeva se snižuje koncentrace kyslíku. Také tvoří izolující vrstvu na povrchu dřeva, na základě sulfátových a fosfátových aniontů.

Anorganické přípravky se snadno penetrují do povrchových vrstev dřeva a jsou vysoce rozpustné ve vodě. Některé přípravky se také vyznačují ochranou dřeva vůči škůdcům. Mají také řadu negativních vlastností. Dobrá rozpustnost ve vodě vede k velmi snadné vyluhovatelnosti ze dřeva vodou. Mezi další nevýhody je zařazena nízká účinnost, vznik koroze a omezená životnost (vztahuje se k povrchové úpravě).

Do nedávna měly retardéry na bázi anorganických solí vysoké postavení, avšak kvůli negativním vlastnostem jejich používání ustupuje. (Netopilová, 2004; Anonymus, 2005).

2.8.1.1 Typy antipyrenů na bázi anorganických solí

Přípravky na bázi dřeva lze rozdělit na dvě skupiny:

- přípravky, které obsahují amonné soli,
- ostatní.

Synpreg

Tato látka je vodou ředitelný koncentrát složený z diamoniumfosfátu, fluorokřemičitanu amonného a smáčedla. Je určený hlavně pro hloubkovou ochranu konstrukcí ze dřeva, ale i pro povrchovou.

Minimální nános na povrch je 350 g.m^{-2} . Tohoto množství dosáhneme tří až pětinásobným ošetřením či namáčením dřeva minimálně čtyři hodiny. Při zkoušce hořlavosti tohoto nánosu byla dosažena třída hořlavosti C2 až D.

Díky vakuo přetlakové impregnaci či dlouhodobému máčení a při hloubkovém nánosu ochranného přípravku 70 g.m^{-2} se dosáhne třída reakce na oheň B až C1.

Životnost ochrany, která je udávána výrobcem a ověřená dlouhodobými zkouškami, je 6 let (Netopilová, 2004; Anonymus, 2005).

Pragokor Pyronit 15

Pyronit je vodorozpustná ochranná látka složená, stejně jako u Synpregu, z diamoniumfosfátu, dále z oxidu boritého. Díky vhodným aditivům se u něj zvýšila přílnavost a ochrana životnosti, zvýšil se nános. Je snížený i korozivní účinek. Pyronit se také vyznačuje ochranou vůči napadení dřevokazným hmyzem a dřevokaznými houbami. Používá se převážně k povrchové ochraně dřeva vůči hoření a šíření ohně.

Doporučený nános na povrch dřeva výrobce je 200 g.m^{-2} . Ten je dosažený po dvou až čtyřnásobném nánosu. Podle třídy hořlavosti se Pyronit zařazuje do skupiny C1 až B. Životnost látky by měla být minimálně 6 let. Je ověřena dlouhodobými zkouškami a doporučují se provádět kontroly v intervalu dvou let (Anonymus, 2005; Chobola, 2012).

Pregnotit

Pregnotit je tekutina čirá, mírně nažloutlá, složená z alkybenzylmethylamonium chloridu tebuconazolu a flufenoxuronu. Slouží také kromě ochrany dřeva vůči hoření také

na ochranu dřeva a zdiva proti plísním, dřevokaznému hmyzu a dřevokazným houbám. Může být také použit na ochranu maleb a omítek. Podle třídy hoření je zařazen do kategorie C1 až B a jeho životnost je minimálně cca tři roky. Doporučené množství nánosu Pregnotitu je 400 g.m^{-2} . To je dosaženo třemi nánosy (Netopilová, 2004).

Acepyrit Forte

Do této kategorie řadíme především síran amonný, fosforečnan amonný, borax, alkalické křemičitany, chlorid amonný, kyselinu boritou, chloridy hořečnaté, vápenaté aj. Prostředek je nehořlavý a rozpustný ve vodě. Chrání dřevo před vznícením i před dřevokazným hmyzem a zabraňuje hnilobě. Nelze použít na ochranu dřeva, které je vystaveno před deštěm nebo zemní vlhkostí. Využívá se v interiérech na impregnaci dřevěných krovů, obkladů a výstavních hal.

Acepyrit Forte lze nanést stříkáním, ponorem, tlakovou impregnací, dlouhodobou penetrací (může trvat několik hodin až několik dní). Nanášíme také klasickým nátěrem. Povrch musí být zbavený mastnoty, prachu a zbytků pryskyřic a vosků. Dle účinnosti třídy hoření se zařazuje do kategorie B. Účinnost přípravku je zajištěna při nánosu 200 g.m^{-2} a dvou až tří vrstev (Chobola, 2012; Caprocb.cz).

Pyroton 50

Hlavními složkami impregnačního přípravku je hydrogenufosforečnan amonný a síran amonný.

Zařazuje se do třídy proti hoření do kategorie C1 až B. Nanáší se ve dvou nátěrech, přičemž je doporučena vrstva minimálně 500 g.m^{-2} (Netopilová, 2004).

2.8.2 Intumescentní retardéry

Intumescentní retardéry mají chemické složení a jejich tepelně technické vlastnosti jsou závislé na teplotě a na podmínkách ohřevu a typu vystavení ohni. Intumescentní přípravky reagují na vysoké teploty nabobtnáním původní tloušťky až na padesátinásobek (Eremina and Korolchenko, 2020). Do této kategorie řadíme především síran amonný, fosforečnan amonný, borax, alkalické křemičitany, chlorid amonný, kyselinu boritou, chloridy hořečnaté, vápenaté aj. (Netopilová, 2004; Eremina and Korolchenko, 2020).

2.8.2.1 Typy intumescentních retardérů

Flamgard

Vodou ředitelná protipožární jednosložková nátěrová hmota je na ochranu dřeva proti hoření a sálání tepla. Flamgard je látka šedobílé suspenze, která je na bázi amonných fosfátů s přidavkem intumescentních (zpěňujících) přísad, polymerů a retardérů hoření. Barva zaschnuté látky je průhledná s odstínem světle žluté.

Před nanesením přípravku musí být dřevo čisté, suché, zbavené mastnot, prachu, kůry a lýka. Aplikace nátěru se provádí minimálně ve třech vrstvách. Mezi vrstvami nátěru musí být časová prodleva minimálně 12 hodin. Jestliže chceme dosáhnout třídy hořlavosti A2 až B, musí být nános Flamgardu minimálně 500 g.m^{-2} . Doba požární odolnosti upraveného dřeva je asi 15 let (Stachema, 2019; Netopilová, 2004). Tento retardér jsme použili v experimentální části.

Dexaryl B

Dexaryl B je dvousložkový protipožární nátěr, který je ředitelný vodou jako Flamgard. Používá se jako povrchová nátěrová hmota na dřevo a materiály na bázi dřeva, dále také na vlnité lepenky a sololit. Především je vhodný na interiéry dřevostaveb a konstrukci krovů, ale i na dřevěné nosníky a sloupy využívané v půdních vestavbách.

Pro dosažení třídy hořlavosti B se musí nanést dvě až čtyři vrstvy nátěru nebo postřiku protipožární úpravy, doporučené je minimálně 600 g.m^{-2} .

Životnost tohoto přípravku není zcela prověřena, ale předpokládá se minimálně 10 let (Netopilová, 2004; Anonymus, 2005).

Pyromors

Taktéž vodou ředitelná nátěrová hmota, jako je Dexaryl B a Flamgard. Je to bílá transparentní látka, která slouží na ochranu dřevěných konstrukcí proti požáru a sálavému teplu. Doporučuje se nános okolo 450 g.m^{-2} , kterého lze dosáhnout dvěma až třemi vrstvami nátěru nebo postřikem. Dle třídy hořlavosti se Pyromors řadí do skupiny A2 až B.

Přípravek je v České republice pouze doporučený až po schválení a praktickém ověření životnosti a vlastností (Anonymus, 2005).

Izotopa L-100

Tato ochranná nátěrová hmota, která je rozpustná ve vodě, slouží k ochraně dřevěných konstrukcí proti hoření i vůči napadení biotickými škůdci. Hmotnost nánosu se pohybuje okolo 250 g.m⁻². Doporučený nános je dosažen při dvou až třinásobném nátěru či postřikem. Dosažená třída reakce proti ohni je B.

Jako u Flamgardu je životnost provedené ochrany nejméně 10 let (Anonymus, 2005; Netopilová, 2004).

Unitherm

Unitherm je nátěrová hmota vodou ředitelná, v transparentním provedení a s krycím lakovaným nátěrem. Je řazena do třídy hořlavosti B až A2. Doporučený nános této látky je cca 400 g.m⁻², množství je dosaženo dvojnásobným nátěrem.

Stejně jako u přípravku Pyromors je jeho použití v České republice jen doporučeno (Netopilová, 2004).

Promadur

Tato protipožární jednosložková, vodou ředitelná látka je ze syntetické pryskyřice bez přidaných rozpouštědel, má bílou barvu nebo je bezbarvá. Nejčastěji se používá u staveb, kde hrozí značné nebezpečí požáru, např. průmyslové stavby. Přípravek je vhodný hlavně do interiérů, ale i do venkovních prostorů, stavba musí být chráněná ještě před deštěm a vlhkostí. Promadur se řadí do kategorie A2 a jeho účinek se dosáhne nánosem 200 g.m⁻² (Netopilová, 2004; Promadur, 2020).

Plamostop D

Jedná se o jednosložkový, neprůhledný (bílý), středně viskózní materiál na ochranu dřeva před ohněm, který zapáchá po polyvinylacetátu. Jako Unitherm je vodou ředitelný. Je určený do vnitřních prostor stavebních objektů. Skládá se z pigmentů, žáruvzdorných plniv a aditiv dispergovaných v polyvinylacetátové disperzi. Dále se skládá ze zpěňujících přísad a fosforečnoamonné soli. Tloušťka nátěru je minimálně 200 g.m⁻² a podle třídy hoření je zařazený do skupiny B. Této reakce lze dosáhnout při jednom až třech nátěrech na suchý povrch dřeva. Při nanesení dvojnásobného množství se může

zařadit do kategorie A2. Díky provedeným zkouškám a dobou užívání v praxi je bezporuchová životnost cca 20 let. (Chobola, 2012; Izostav, 2019).

Tabulka 7 Přehled vlastností vybraných retardérů hoření

Přípravek	Min. množství nánosu [g.m⁻²]	Stupeň hořlavosti	Životnost
PYROTON 50	500 (2 nánosy)	C1	-
SYNPREG	350 (3 – 4 nánosy)	C2 – C1	3 – 5 let
PYRONIT 15	150 – 200 (2 – 4 nánosy)	C1 – B	min. 5 let
PREGNOLIT	400 (3 nánosy)	C1	min. 3 roky
IZOTOPA 100	250 (2 – 3 nánosy)	B	min. 10 let

(Zdroj: Netopilová, 2004)

2.8.3 Organické retardéry hoření

Tyto antipyreny jsou snadno zpracovatelné a ekologicky bezpečné. Organické zpomalovače hoření můžeme rozdělit na citráty (kyselina citrónová) a umělé živice (močovino-formaldehydové sloučeniny), které se používají s fosforečnanem amonným, mají dobrou účinnost proti hoření dřeva (Horký, 1987).

2.8.4 Použití retardérů hoření na rostlé dřevo a termicky modifikované dřevo

Samotný retardér hoření určuje způsob aplikace, např. intumescentní (zpěňující) retardér se aplikuje pouze nátěrem na povrch materiálu. Naopak retardéry na bázi anorganických solí lze aplikovat nátěrem, impregnací nebo máčením (Makovický and Osvaldová, 2004). Termicky modifikované dřevo má oproti rostlému dřevu v třídě hořlavosti D horší požární vlastnosti. Při chemické ochraně dřeva je nezbytně nutné provádět nátěry ve větších

vrstvách a s větší pečlivostí. Za maximální zlepšení považujeme, když se požární odolnost zařadí do třídy hořlavosti A.

Jelikož je rostlé dřevo také zařazeno do třídy hořlavosti D, tak jsou u termicky upraveného dřeva použity stejné retardéry hoření (Potůček, 2015).

2.9 TERMICKÁ MODIFIKACE DŘEVA

Termická modifikace dřeva je na trhu více než dvacet let. V současnosti existuje už několik typů tepelné úpravy. Principy typů se liší v použitém médiu a teplotě. Mezi nejznámější patří:

- ThermoWood – Finsko (dřevo se připravuje v atmosféře vzduchu),
- RetificatedWood – Francie (připravuje se v prostředí interních plynů),
- Les Bois Perdure – Francie (dřevo se nejdříve vysouší a poté se připravuje v parním prostředí zbytkovou vlhkostí ve dřevě),
- PlatoWood – Nizozemí (připravuje se v prostředí vodní páry),
- OHT, RoyalWood – Německo (připravuje se v olejích),
- Huber Holz – Rakousko (připravuje se v prostředí vodní páry),

Existují další principy, které nejsou tolik známé:

- FirmoLin – Nizozemí (připravuje se v prostředí přehřáté páry),
 - Termovuoto – Itálie (připravuje se ve vakuu),
 - Wood Treatment Technology – Dánsko (připravuje se v prostředí přehřáté páry),
- (Gašpařík et al., 2017; Vernois, 2000; Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Nejčastěji se používá ve Finsku a západní Evropě (Reinprecht, 2001). Finsko bylo první státem, který začal vyrábět výrobky pod názvem Thermowood, později se začaly vyrábět také v Rakousku, Německu, Nizozemí a Francii (Esteves and Pereira, 2009).

Termická modifikace se může popsat jako proces, při kterém se na dřevo aplikují vysoké teploty v prostředí s různými médii (olej, dusík atd.). Tepelná úprava se uskutečňuje teplotami od 100 až 300 °C a má dva rozdílné účely:

1) změkčení dřeva ve vodě či páře (vaření, paření) ke zlepšení dalšího zpracování a k uvolnění vnitřních napětí, dochází k tomu při teplotách 50 až 140 °C,

2) řízení degradace dřeva, která zahrnuje teploty od 150 do 260 °C, za účelem zlepšení např. rozměrové stability a odolnosti proti rozpadu (Gašpařík et al., 2017; Sandberg and Kutnar, 2016; Bekhta and Niemz, 2003).

Když teploty překročí 300 °C, může dojít k silné degradaci dřeva (Sandberg and Kutnar, 2016).

Do této skupiny technologických operací se neřadí termická modifikace rostlého dřeva, které je vystaveno vysokým teplotám, nižším než jeho spalování (způsobuje nebo spouští jeho degradaci chemických složek), 150–260 °C. Při této technologii se záměrně mění chemická struktura dřeva (Esteves and Pereira, 2009; Santini and kol., 2014).

Dřevo se vysokým teplotám vystavuje také při umělém sušení, a i u lisování dřevěných kompozitů (např. dřevovláknité, dřevotřískové, překližované atd.). Pro výrobu dřevěných kompozitů se využívají teploty v rozmezí od 110 do 130 °C. Teploty překročí teplotu 150 °C pouze krátkodobě, nevyvolávají žádné trvalé změny ve vlastnostech dřeva a chemické struktury (Bekhta and Niemz, 2003).

Tuto metodu používali již naši předkové, opalovali konce tyčí plotu tak, aby zvýšili přirozenou trvanlivost dřeva. Proces, jak ho dnes již známe, popsal v roce 1915 Harry Tiemann. V jeho práci bylo řečeno, že ohříval suché dřevo na přehřátou páru na 150 °C a objevil snížení hygroskopicity tepelně upraveného dřeva. Bohužel kvůli náročnosti nebylo umožněno plné a bezproblémové technologické zvládnutí výroby (Hill et al, 2020; Zobel and Sprague, 1998).

Díky termické modifikaci dřeva se zvyšuje rozměrová stabilita, má vyšší odolnost proti dřevu zbarvujícím houbám a plísním a dřevokazným houbám. Vyznačuje se nižší hygroskopicitou a udržuje či zlepšuje mechanické vlastnosti, mezi které patří pevnost, tvrdost a tuhost. Modifikované dřevo zlepšuje svou estetiku (barvu, lesk, netvoří se tolik trhliny atd.), také zvyšuje odolnost proti napadení dřevokazným hmyzem (Barčík a Homola, 2004).

Termicky modifikované dřevo se oproti dřevu neupravenému lépe opracovává, může však dojít k uvolnění prchavých látek a tvoří se jemný prach při broušení. Při lepení je vhodnější používat polyuretanová nebo fenolická lepidla než lepidla na bázi PVAC, ta nejsou vhodná. K povrchové úpravě se nejvíce používají alkydové nátěrové hmoty na bázi organických rozpouštědel nebo oleje. Z hlediska migrací pryskyřic, tuků a dalších látek na povrchu dřeva nejsou vhodné vodou ředitelné akrylátové nátěrové hmoty (Ptáček, 2009).

Předpokládáme, že obráběné termicky upravené dřevo má lepší hladkost než dřevo takto neupravené (Sandak et al., 2017).

Termicky upravovat se dají všechny druhy dřevin. Termodřevo se však nejvíce vyrábí z dřevin, které nejsou příliš trvanlivé či netrvanlivé, mezi ně patří např. borovice, jasan, smrk, bříza, buk a osika (Reinprecht, 2012).

2.9.1 Materiály používané na termickou úpravu

Jak je již výše řečeno, k termické modifikaci se používají dřeviny s malou trvanlivostí. Vyrábí se jak z jehličnatého dřeva, tak z listnatého. Nejčastěji se používá smrk (*Picea abies L.*) a borovice (*Pinus sylvestris L.*), z listnatých dřevin to jsou buk (*Fagus sylvatica*), jasan (*Fraxinus*), bříza (*Betula L.*), dub (*Quercus*), osika (*Populus tremula L.*) ale i jiné (Zobel and Sprague, 1998).

U borovice (*Pinus sylvestris L.*) je vyznačené jádro i běl, která se lépe impregnuje. Dřevo má větší počet pryskyřičných kanálek, které při termické úpravě zmizí. Z pohledu impregnace má smrk (*Picea abies L.*) horší vlastnosti a není vůči biotickým škůdcům odolný. Smrk (*Picea abies L.*) se dobře opracovává. Bříza (*Betula L.*) se dobře opracovává i suší, její trvanlivost je ale nižší. Osika (*Populus tremula L.*) s břízou (*Betula L.*) se využívají hlavně v interiéru (Šlezingerová a Gandelová, 2001).

2.9.2 Výroba termicky modifikovaného dřeva

V současné době se termodřevo vyrábí více technologickými procesy. Nejčastější výrobní technologie v Evropě jsou:

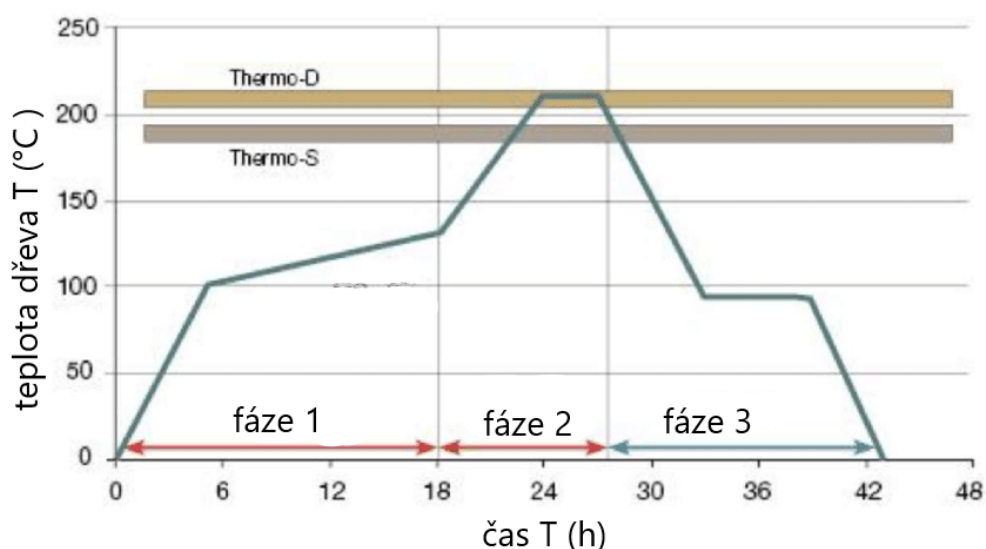
2.9.2.1 ThermoWood proces (horký vzduch)

Tento způsob výroby se dělí na tři etapy, které jsou licencované ve Finsku. Celý proces trvá přibližně 36 hodin.

V první fázi dochází k rychlému zvýšení teploty v sušárně na 100 °C, pak pomalu stoupá na teplotu okolo 130 °C. Poté dochází k sušení dřeva na skoro nulovou hodnotu. Po této etapě vzniká suché dřevo, které neobsahuje vodu vázanou ani vodu volnou. V etapě druhé se teplota zvýší na 185 až 215-230 °C po dobu 2–3 hodin (Sahín, 2017). Podle teploty a času působení se posléze dělí na Thermo-S (Stability – stabilita) a Thermo-D (Durability – trvanlivost). Thermo-S má u listnatých dřevin maximální teplotu

185 °C a u smrku 190 °C. Konečná vlhkost ve vnitřním prostředí je 6–8 %, podle evropské normy EN 113. Thermo-D se uplatňuje v exteriéru. Teplota u jehličnatých dřevin je 212 °C a u listnatých to je 200 °C (Viitaniemi a Jasma, 1996. Reinprecht a Vidholová, 2008; Prokom, 2020; FTWA). V poslední třetí etapě se termicky modifikované dřevo ochlazuje, aby konečná vlhkost byla okolo 4–6 %.

Tento druh dřeva se používá do interiéru na výrobu obložení stěn, palubek, parket, kuchyňského nábytku, ale také na sauny. Do exteriéru se využívá na dveře, panely na budovách, okna nebo na zahradní nábytek (ITWA, 2016).



Obrázek 3 Schéma výroby termicky modifikovaného dřeva Thermo-wood

(Zdroj: Sahín, 2017)

2.9.2.2 PLATO proces (= Providing Lasting Advanced Timber Option, Vodní pára)

Tato metoda se začala používat před asi dvaceti lety v roce 2000 a vznikla v Nizozemsku. Na reakci se podílí tlak a nedosahuje tak vysokých teplot jako ThermoWood proces. PLATO technologie se skládá ze čtyř etap. Doba procesu záleží hlavně na druhu dřeviny, její tloušťce a geometrii. Používá se hlavně pro venkovní prostředí a hlavní výhody jsou v tvarové stabilitě. Celý proces může trvat i několik dní, asi 10 až 13 dnů. Maximální teplota dosahuje 190 °C (Reinprecht a Vidholdová, 2008; Horáček, 1998; Platowood, 2020).

První etapou PLATO technologie je hydrotermická úprava buď čerstvého, anebo suchého dřeva. Použitá teplota je od 150 až 190 °C a tlak od 0,6 až 1 MPa. Metoda trvá i

několik hodin (až 5 hodin). Další etapou je sušení, kdy se dřevo suší po dobu 3 až 5 dní, někdy i pár týdnů. Musí se vysušit na vlhkost 8 až 10 %. Ve třetí etapě dochází ke stabilizaci dřeva, tj. vytvrzování po dobu 12 až 16 hodin při teplotě stejné jako u etapy první a při atmosférickém tlaku 0,1 MPa (desetkrát menší než u první fáze) za omezeného přístupu vzduchu. Vlhkost dřeva klesá na 1 % při vzájemném působení hemicelulózy a ligninu. Ve čtvrté závěrečné fázi se opětovně v sušárnách zvlhčuje dřevo na 4 až 6 %. Tato část může trvat asi 3 dni (Sahín, 2017; Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Důležitá je u hořlavosti evropská norma ČSN EN 13501–1 (730860). Platowood se řadí do skupiny B, která vykazuje omezené šíření plamene. Ze 7 možných tříd to je 3. třída (Kupilík, 2006).

2.9.2.3 OHT proces (= Oil Heat Treatment)

Metoda vznikla v Německu. Zakládá se na výrobě v horkých rostlinných olejích, které zajišťují stejný a rychlý přenos tepla do dřeviny a stejné podmínky po celé nádobě (Sidorová, 2008). Vykonává se v impregnačním kotli s olejem s teplotou od 200 do 220 °C. Během této technologie se ve dřevě udržuje malé množství kyslíku. Doba ohřevu závisí na druhu dřeviny, nejdůležitější věc je ohřev celé jeho části, kdy horký olej do dřeva vniká postupně. Ve střední části materiálu je nutné udržet teplotu od 180 do 200 °C, nesmí klesnout pod 180 °C, po dobu 2 až 4 hodin. Olej se vsakuje i do buněčných stěn dřeva, tím se zhoršuje protipožární odolnost (Reinprecht, 2001; Reinprecht a Vidholdová, 2008).

Oleje, které se používají, jsou lněný, slunečnicový, řepkový a sójový. Nejčastěji se využívá lněný olej, ten umožňuje rovnoměrný a rychlý přenos tepla k dřevním buňkám a snižuje v nich přítomnost kyslíku. Nevýhodou lněného oleje je zápach při tepelném zpracování (Sahín, 2017; Rapp and Sailer, 2016).

2.9.2.4 Royal proces

Jako další metoda je Royal proces. Je to termická modifikace dřeva olejem za sníženého tlaku. Nepoužívají se tak vysoké teploty jako u předchozích procesů, ale pohybují se okolo 60 až 90 °C (nejdříve se to používalo jen na sušení dřeva). Olej, který se při této technologii používá, nevniká do buněčných stěn. Tato technologie vznikla v Osmose (Reinprecht, 2001).

2.9.2.5 RetificatWood

Metoda vznikla ve Francii. Dochází při ní k postupnému zvyšování teploty dřeva do teplot 210 až 260 °C v interní atmosféře dusíku, podíl kyslíku musí být menší než 2 %. Kdyby byl větší než 2 %, tak může dojít ke zhoršení pevnosti a ohybových vlastností. Při této metodě dochází k mírné pyrolýze. Zlepšuje odolnost proti biologickým činitelům a rozměrovou stabilitu. Termooxidační reakce probíhají ve dřevě v menší míře. Tím se vlastně zachovává jeho pevnost. Před tímto procesem je nutné dřevo vysušit na vlhkost 12 %. Proces trvá od 8 do 12 hodin. (Duchez and Guyonnet, 1998; Reinprecht a Vidholdová, 2008).

2.9.3 Vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Důležité při výrobě termicky modifikovaného dřeva je, jak se změní hygroskopicitu, hustota, rozměrová stálost, pevnost, protipožární ochrana, odolnost proti povětrnosti, akustické vlastnosti, barva a jeho tepelně izolační vlastnosti dřeva (Reinprecht, 2001).

2.9.3.1 Hygroskopicitu

Hygroskopicitu dřeva je velmi důležitá vlastnost termicky modifikovaného dřeva, která se snižuje působením tepla při modifikaci. Ovlivňuje vlastnosti, a to hlavně odolnost vůči biologickým činitelům a rozměrovou stálost (Gündüz et al., 2008). Je to schopnost dřeva odevzdávat a přijímat vodu do okolního prostředí při určité teplotě a rovnovážné vlhkosti. Termicky upravené dřevo má oproti rostlému dřevu hygroskopicitu nižší (Reinprecht, 2001). Takto upravené dřevo je vhodné používat tam, kde se požaduje minimální vlhkostní zpracování (např. parkety v interiéru, terasové podlahy v exteriéru atd.) (Yildiz et al., 2006).

2.9.3.2 Rozměrová stálost

Při snížení rovnovážné vlhkosti dřeva z důvodu tepelného zpracování dochází ke zlepšení rozměrové stálosti. (Esteves and Pereira, 2009). Rozměry dřeva se mění s obsahem vody vázané. Dřevo zvětšuje své rozměry díky přijímání vody vázané, tento jev nazýváme bobtnáním. Pokud se ze dřeva voda vázaná odstraňuje, tak se tento jev

nazývá sesychání. Nejčastěji se rozměrové změny vyskytují v příčném řezu. U podélného směru jsou změny minimální, až 20x menší než ve směru tangenciálním.

Při sesychání a bobtnání dochází k borcení dřeva, u termicky modifikovaného dřeva je změna rozměrů poloviční oproti původnímu dřevu. U borcení dochází ke změně tvaru dřevěných výrobků, jako je ohnutí nebo stočení dřeva. Rychlým sušením může dojít ve dřevě k napětí. (Horáček, 1998; Reinprecht a Vidholdová, 2008).

2.9.3.3 Biologická odolnost

Odolnost termodřeva v tomto ohledu závisí hlavně na procesu jeho výroby a na expozičních podmínkách. Oproti neupraveným dřevinám má vyšší odolnost proti dřevokazným houbám, plísním, dřevu zbarvujícím houbám (Gašpařík et al., 2017; Barčík a Homola, 2004). Dřeviny, které jsou před modifikací netrvanlivé či málo trvanlivé, jsou po úpravě až velmi trvanlivé (Reinprecht, 2008).

2.9.3.4 Barva a vůně

Při termické úpravě dřeva v důsledku vysoké teploty se barva mění na tmavší odstín (je nahnědlé). Barva je velmi často podobná tropickým druhům dřeva. Vůně termodřeva se velmi podobá karamelu (Hasanagić, 2019).



Obrázek 4 Barevné změny termicky upraveného dřeva

(Zdroj: Freewood, 2019)

2.9.3.5 Hustota

Při termické úpravě se ze dřeva odbourávají hemicelulózy i další doprovodné látky. Hustota dřeva se snižuje, avšak méně než jeho hmotnost. Thermowood má nižší hustotu

než rostlé dřevo a narušením hemicelulóz se zhoršují některé další vlastnosti (odolnost proti abrazivním vlivům) (Mayes and Oksanen, 2003).

2.9.3.6 Pevnost

Pevnost se většinou u termicky upravených dřev zhorší. Vysoké teploty narušují komponenty dřeva, především hemicelulózu, tím negativně ovlivňují jeho pevnostní vlastnosti. Snížení pevnosti termodřeva závisí hlavně na výrobním procesu a na druhu dřeva (Hale a kol., 2005; Rapp a Sailer, 2001; Esteves a kol., 2005). Dřevo po této úpravě je křehčí a klesá jeho tahová a ohybová pevnost, obvykle od 10 do 30 %. Bez velkých změn zůstává tuhost termodřeva (občas se mírně zvyšuje). Dále také bez změny zůstává tlaková pevnost a povrchová tvrdost. Přesto se termicky upravené dřevo nedoporučuje na nosné prvky dřevěných konstrukcí (Reinprecht, 2008).

2.9.3.7 Protipožární odolnost

U termodřev se požární ochrana tolik nemění. Když je ale připraveno OHT technologií, tak se vlivem zbytkových olejů a vosků zčásti snižuje odolnost proti šíření plamene (Wang and Cooper, 2007).

2.9.3.8 Tepelná vodivost

Je známo, že tepelná vodivost závisí na druhu dřeviny, vlhkosti, hustotě, směru vláken a směru toku tepla (Sahín and Keskín, 2016). Vodivost se sníží cca o 20 %. Tato hodnota závisí na rychlosti toku tepla ve dřevě (Reinprecht a Vidholdová, 2008).

2.9.3.9 Akustické vlastnosti

Ve studiích bylo zjištěno, že mírná tepelná úprava zlepšuje zvukové vlastnosti dřeva, které jsou nezbytné pro hudební nástroje. Termicky modifikované dřevo je také navrženo pro rekonstrukci a obnovu historických hudebních nástrojů. Díky své zvýšené rozměrové stabilitě se akustické vlastnosti zlepšily za vlhkých podmínek a jsou tedy vhodné pro používání v často měnících se klimatických podmínkách (Ahmed and Adamopoulos, 2018; Pfriem et al., 2005). Jejich struktura se shoduje s dlouhodobě přirozeně skladovanými dřevinami. Vyznačují se mírným nárůstem Youngova modulu (tzv. modul pružnosti v tahu) (Reinprecht, 2008).

2.9.4 Použití termicky modifikovaného dřeva

Termicky modifikované dřevo se může díky své pevnosti a odolnosti proti biologickým činitelům (plísně, hmyz) používat pro venkovní opláštění, palubky, podlahy. Používá se také v truhlářství (vchodové dveře, okna, zahradní nábytek, ploty a dětská hřiště) a pro výrobu elektrických kytar, kde výrobci používají termodřevo pro akustické zvukové desky a hmatníky. Dnes se také používá do interiéru na kuchyňský nábytek, parkety, ale také na výrobu saun (Ecochoice, 2020; Hill et al., 2020; Sahín and Keskin, 2016).

3 METODIKA

Metodiku lze na základě cíle práce rozdělit na tyto části:

- analýza literárních poznatků,
- příprava zkušebních těles,
- značení zkušebních těles,
- vážení a měření zkušebních těles,
- termická modifikace zkušebních těles,
- fyzikální vlastnosti,
- impregnace těles přírodním retardérem
- impregnace těles syntetickým retardérem,
- měření těles na kónickém kalorimetru,
- chemické analýzy,
- vyhodnocení výsledků,
- výsledky a diskuze.

4 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Experimentální část bakalářské práce se skládá ze sledování a porovnávání výsledků. V práci se mohou vyskytovat kromě slovního textu také informace vyjádřené v obrazové formě a symboly.

4.1 Příprava zkušebních těles

Vzorky, které se testovaly, jsou z modřínového dřeva, a byly radiálně nařezány na rozměry 100 x 100 x 20 mm (šířka x délka x tloušťka). Modřín je charakteristický svou světle žlutohnědou bělí a okrovým až červenohnědým jádrem. A díky své pevnosti a pružnosti je vhodný pro výrobu nábytku a pro stavební účely.

Bylo připraveno 60 zkušebních těles, které se následně rozdělily dle aplikace retardéru hoření:

- nemodifikované a termicky upravené vzorky bez úpravy retardéru hoření,
- nemodifikované a termicky upravené vzorky s přírodním retardérem hoření,
- nemodifikované a termicky upravené vzorky se syntetickým retardérem hoření.

4.2 Značení zkušebních těles

Zkušební vzorky se značily následovně: druh dřeviny/stupeň termické modifikace/typ retardéru nebo bez retardéru/ číslo vzorku, např. MO/160/A/1. Kde A – Arabinogalaktan (přírodní retardér), FL – Flamgard (syntetický retardér), W – neošetřeno.

4.3 Vážení a měření zkušebních těles

Zkušební tělesa byla před i po impregnaci váženy na laboratorní digitální váze Kern s přesností na 0,1 g. Rozměry vzorků byly změřeny digitálním posuvným měřítkem.



Obrázek 5 Vážení vzorku

(Zdroj: vlastní)

4.4 Termická modifikace zkušebních těles

Zkušební tělesa, která byla určena k termické modifikaci, jsme upravili v tepelné komoře typu S400/03 (LAC s.r.o., Rajhrad, Česká republika). Modifikace proběhla dle metody ThermoWood®. Proces sušení byl vykonán podle normy ISO 13061-1:2014. Tepelná úprava byla provedena ve třech fázích:

- ohřev,
- termická modifikace,
- chlazení.

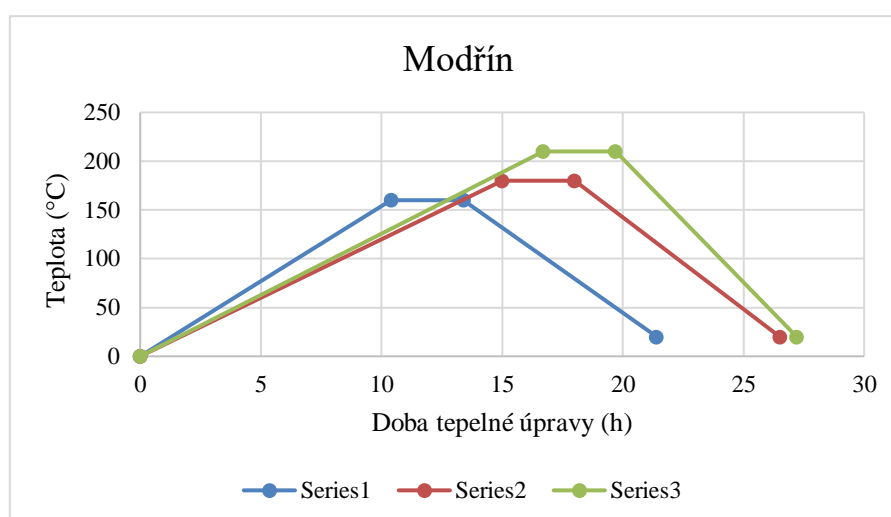
Jednotlivé fáze a teplotní profil jsou uvedeny v tab. 8. Ve fázi ohřevu se zkušební tělesa zahřívala a vysoušela na požadovanou teplotu (160 °C, 180 °C a 210 °C). Při druhé fázi byla teplota udržována po dobu 3 h. A ve třetí fázi byla tělesa ochlazována a klimatizována, aby se dosáhlo obsahu vlhkost 5-7 %.

Tabulka 8 Procesy termické modifikace

	Proces termické modifikace		
	160 °C	180 °C	210 °C
Ohřevu	10,4 h	15 h	16,7 h
Termická modifikace	3 h	3 h	3 h
Chlazení	8 h	8,5 h	8 h
Celkový čas	21,4 h	26,5 h	27,7 h

(Zdroj: vlastní)

Na obr. 6 je znázorněna doba trvání a podmínky termické modifikace, v našem případě při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C.



Řada1 – T – 160 °C, Řada2 – T – 180 °C, Řada3 – T – 210 °C.

Obrázek 6 Průběh tepelné modifikace

(Zdroj: vlastní)

4.5 Fyzikální vlastnosti

Hustota je doplňkové kritérium, které pomáhá během třídění zkušebních těles dle jejich kvality. Hustota dřeva byla stanovena před a po termické modifikaci dle normy ISO 13061-2:2014.

4.6 Impregnace těles přírodním retardérem

Jako přírodní retardér jsme použili arabinogalaktan. Což jsou hemicelulózy a ty se často vyskytují v primárních a sekundárních buněčných stěnách buněk rostlin. Arabinogalaktany se u většiny rostlin objevují v kovalentních spojeních s bílkovinami, jako jsou proteoglykany či glykoproteiny. Jsou extrahovány z modřínu a rozpustné ve vodě. A je možné je izolovat z modřínového dřeva, a to v množství 10-20 % (Gaff a kol., 2019).

Arabinogalaktan byl v tomto experimentu nanesen na zkušební těleso ponorným postupem. Roztok byl udělán s 16 g prášku arabinogalaktanu zředěného ve vodním roztoku na 1 kg dřeva). Po nanesení došlo k sušení retardéru, který se sušil min. 24 h.

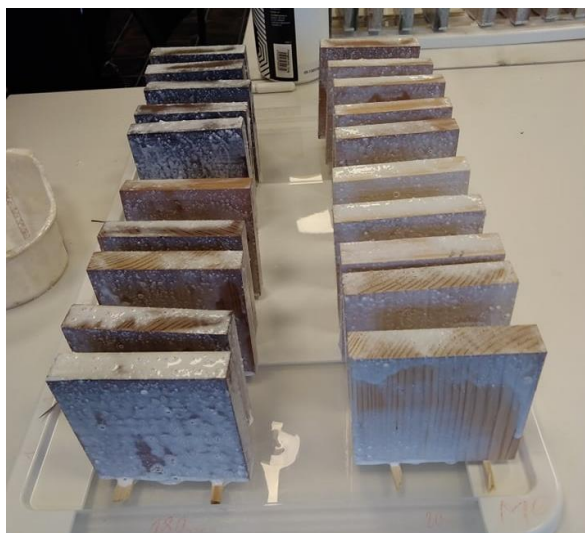


Obrázek 7 Impregnace Arabinogalaktanem

(Zdroj: vlastní)

4.7 Impregnace těles syntetickým retardérem

Jako syntetický retardér pro ochranu dřeva jsme použili Flamgard. Vyrábí ho společnost Stachema a.s. ze Slovenska. Jedná se o protipožární nátěrovou zpěňující hmotu na vodní bázi, která se skládá z koksotvorné složky, minerální kyseliny (kyselina fosforečná), plniva, pojiva, aditiva a další pomocné látky. V procesu hoření se na povrchu materiálu vytváří silná nehořlavá vrstva izolující teplo, která chrání materiál před vystavením ohni a sálavému teplu.



Obrázek 8 Impregnace Flamfardem

(Zdroj: vlastní)

Retardér se nanáší ve dvou vrstvách tak, aby celkově bylo 500 g/m^2 , což odpovídá 250 g/m^2 na jeden nános (Stachema, 2019). Po obou nánosech je nutné nechat retardér zaschnout alespoň 24 h.



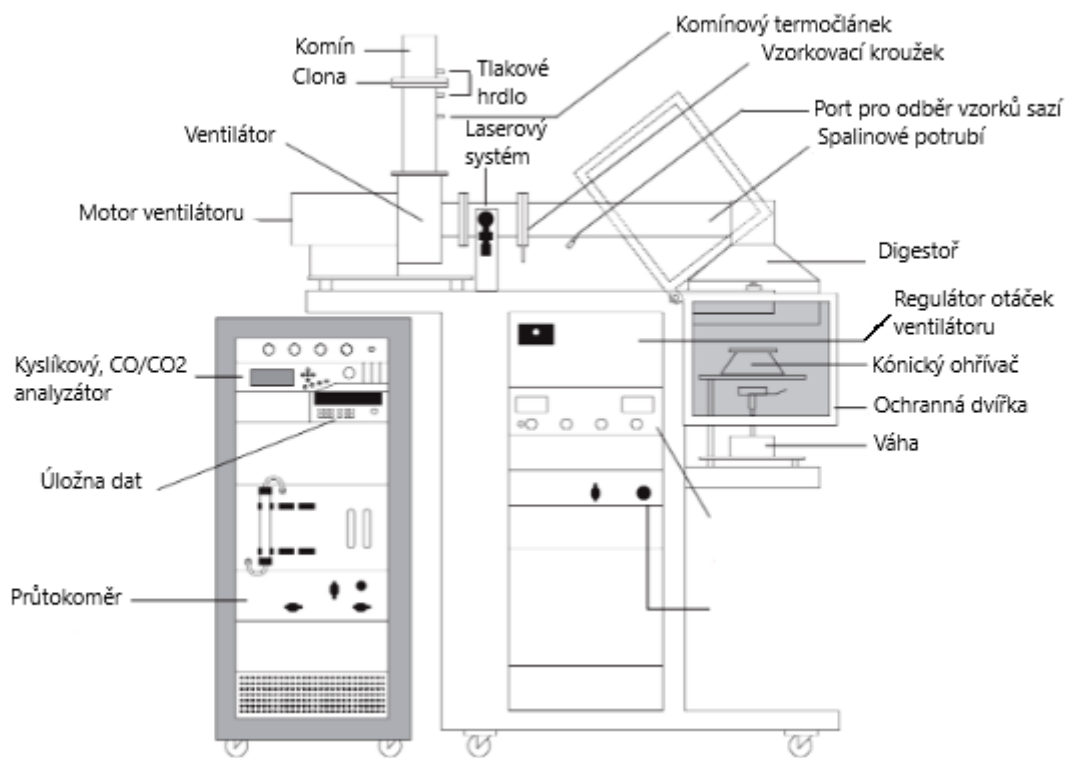
Obrázek 9 Flamgard

(Zdroj: Stachema, 2019)

4.8 Měření těles na kónickém kalorimetru

Měření jsme provedli na kónickém kalorimetru podle normy ISO 5660-1:2015. Kónický kalorimetr je přístroj, který analyzuje spaliny a měří produkovaný kouř ze zkušebního tělesa, které je vystaveno určitému tepelnému toku. Dokáže určit rychlost

uvolnění tepla pomocí modelových těles na základě spotřeby kyslíku a koncentrace oxidu uhličitého a uhelnatého při zatížení teplem.



Obrázek 10 Schéma kónického kalorimetru

(Převzato a přeloženo od Lindholm et al., 2009)

Před provedením experimentů musela být provedena kalibrace stroje. Po zapnutí napájení ohřivače a ventilátoru se nastaví ozáření a průtok výfukového plynu. Jakmile se dosáhlo rovnováhy ohřivače, tak se musela zaznamenat jeho průměrná teplota. Nejdříve byla provedena kalibrace přesnosti hmotnosti po dobu 30 s. Musela se nastavit výška kuželového ohřivače do stejné polohy jako při testování těles (aby byl vzorek cca 25 mm pod kuželem). Poté se na váhu položilo těleso s hmotností asi 500 g. Po dosažení rovnováhy se změnil výkon vážicího zařízení a upravil se na nulu. Před touto kalibrací musel být vypnut kuželový ohřivač a přístroj byl ochlazen na okolní teplotu.

Následuje kalibrace analyzátoru kyslíku, která se může provádět se zapnutým ohřivačem kužele nebo ne. Zapnuli jsme odtahový ventilátor a nastavili průtok výfukového plynu. Pro vynulování se analyzátor naplnil plynným dusíkem. Poté se upravila odezva analyzátoru na nulu.

Dále následovala kalibrace zářiče, aby se na povrchu vzorku vytvořil požadovaný tok. Pod kužel (25 mm) se umístil vodní chladič tepelného toku a upravovala se teplota kuželu, dokud tepelný tok nedosáhl 25 kW/m^2 . Trvala 10 min.

Poslední kalibrací byla kalibrace uvolňování tepla, kde se zjišťovala konstanta C (konstantní clona). Při kalibraci se shromažďovala data v pětisekundových intervalech po dobu 1 minuty. Pomocí kalibrovaného průtokoměru se zaváděl metan do kalibračního hořáku. Poté se metan nechal hořet konstantní rychlostí po dobu tří minut.

Po kalibraci došlo k samotnému měření zkušebních těles. Hodnoty každého tělesa (název, velikost, tloušťka) byly zaznamenány do počítače. Vzorky se vložily do držáku a zvažily se. Poté jsme stiskli tlačítko START a čekali jsme 60 s, než se nashromáždila veškerá data. Interval snímání dat je 5 s. Dále jsme sejmuli kryt chladiče a spustili jiskru pro zapálení. Zkušební těleso jsme sledovali, než došlo k zažehnutí trvalého plamene, stiskli jsme tlačítko STISK a odebrali jsme zapalovač. Během zkoušky se shromažďovala všechna data. Tělesa se měřila po dobu asi 30 min.

Vyhodnocovalo se 14 charakteristik reakce na oheň, avšak já jsem si vybrala na hodnocení pouze 6, kterými jsou: maximální rychlost uvolňování tepla, čas při maximálním uvolňování tepla, celkové teplo, hmotnost po ukončení testu, úbytek hmotnosti, rychlost úbytku hmotnosti.



Obrázek 11 Kónický kalorimetr

(Zdroj: vlastní)

4.9 Chemická analýza

Aby se zjistilo chemické složení vzorků, tak byly vzorky mechanicky rozdrčeny na piliny o velikosti 0,5-1 mm a extrahovaly se v Soxhletově aparátu směsí etanolu a toluenu podle metody ASTM D1107-96. Obsah ligninu byl určen metodou ASTM D1106-96 a obsah holocelulóz byl stanoven metodou autorů E. L. Wise, M. Murphyho a A. A. D'Addiecoio, 1946. Obsah celulózy se zjistil Seifertovou metodou. Hladiny hemicelulózy byly vypočteny jako rozdíl mezi homocelulózou a celulózou (Gaff, et al. 2019). Všechna měření byla aplikována ve 4 opakováních na vzorek.

4.10 Vyhodnocení výsledků

Pro určení vlivu jednotlivých faktorů na požární charakteristiky byl proveden Fišerův F-test v softwaru Statistica 12 (Statsoft Inc., USA) a analýza rozptylu ANOVA. Získané charakteristiky reakce na oheň a chemické složení byly vyhodnoceny analýzou rozptylu ANOVA.

Zkušební tělesa jsou pro tento výzkum z modřínového dřeva (*Larix*). Pro statické vyhodnocení výsledků byla použita více faktorová analýza v softwaru Statistica 12. Pomocí této analýzy rozptylu se vyhodnocují účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemné kombinace. K vyhodnocení vzájemné kombinace faktorů a jejich účinků byl použit Fischerův F test a hladina významnosti $\alpha = 0,05$. Hodnota P (teorie pravděpodobnosti) nám stanovuje hladinu významnosti. Podle jeho hodnoty lze testovaný faktor ohodnotit následovně:

$P = 0$ faktor působí,

$P = 0,05$ vliv faktoru je na hranici statistické významnosti,

$P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,

$P > 0,05$ vliv faktoru není 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.

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 Fyzikální vlastnosti

V tab. 9 jsou zapsány průměrné hodnoty hustoty vzorků modřínu stanovené před a po termické modifikaci s variačním koeficientem.

Tabulka 9 Průměrné hodnoty hustoty vzorků před a po termické modifikaci modřínového dřeva s variačním koeficientem

Retardér hoření	Teplota TM (°C)	Hustota před TM (kg/m ³)	VK (%)	Hustota po TM (kg/m ³)	VK (%)
Bez retardéru hoření	20	503,29	0,71	503,29	0,71
	160	508,93	0,48	563,31	25,66
	180	508,16	0,45	32,07	19,43
	210	507,44	0,78	499,15	16,11
Syntetický retardér hoření	20	502,09	0,51	502,09	0,51
	160	506,55	1,02	606,38	17,17
	180	510,24	0,63	33,78	26,96
	210	514,50	1,45	457,24	21,23
Přírodní retardér hoření	20	507,02	1,06	507,02	1,06
	160	506,09	1,28	510,93	24,07
	180	507,54	0,71	506,41	11,86
	210	510,80	1,97	454,83	14,78

TM – termická modifikace, VK – variační koeficient.

(Zdroj: vlastní)

5.2 Chemická analýza

V tab. 9 jsou zaznamenány průměrné hodnoty chemických složek dřeva s variačními koeficienty (VK) v závorkách v %. Ve srovnání se dřevem bez tepelné úpravy se průměrné hodnoty extraktiv zvýšily ve třech různých teplotách od 160 °C do 210 °C, kde teplota termické úpravy 210 °C měla nejvyšší nárůst. Průměrná hodnota ligninu se s vyšší teplotou mírně zvýšila. Rovněž u celulózy dochází ke zvyšování jejích hodnot se zvyšující se teplotou úpravy. Průměrné hodnoty hemicelulózy a holocelulózy vykazují pro všechny teploty výrazný pokles.

Tabulka 10 Průměrné hodnoty chemické analýzy prvků

TM (°C)	Extraktiva (%)	Lignin (%)	Holocelulóza (%)	Celulóza (%)	Hemicelulóza (%)
Bez TM	2,96 (1,79)	25,31 (0,57)	73,16 (0,11)	45,52 (0,34)	27,65 (0,56)
160	3,07 (1,81)	25,60 (0,99)	71,51 (0,36)	45,60 (0,56)	25,91 (1,47)
180	3,58 (3,69)	27,55 (0,48)	69,40 (0,42)	47,28 (0,45)	22,12 (1,13)
210	6,81 (2,48)	31,66 (0,97)	61,62 (0,60)	49,19 (0,34)	12,43 (3,35)

TM – termická modifikace

(Zdroj: vlastní)

Tab. 11 zobrazuje výsledky jednofaktorové analýzy, která hodnotí účinek teploty termické modifikace na hodnoty chemických komponentů. A na základě úrovně významnosti “P“ můžeme říci, že termická modifikace má velmi významný vliv na chemické složení.

Tabulka 11 Jednofaktorová analýza rozptylu hodnotící účinek teploty na hodnoty změn chemických komponentů

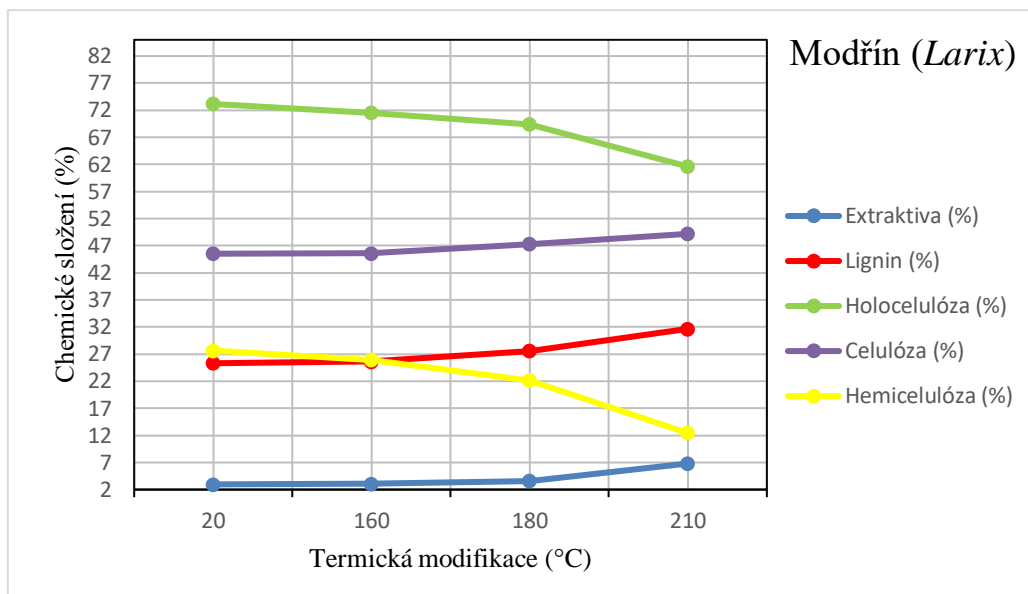
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Extraktiva (%)					
Intercepce	269,6985	1	269,6985	20822,79	***
TM (°C)	39,9436	3	13,3145	1027,98	***
Chyba	0,1554	12	0,0130		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Lignin (%)					

Intercepce	12127,52	1	12127,52	247017,2	***
TM (°C)	102,76	3	34,25	697,7	***
Chyba	0,59	12	0,05		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Holocelulóza (%)					
Intercepce	76004,98	1	76004,98	1031392	***
TM (°C)	312,70	3	104,23	1414	***
Chyba	0,88	12	0,07		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Celulóza (%)					
Intercepce	35191,88	1	35191,88	876328,3	***
TM (°C)	35,99	3	12,00	298,7	***
Chyba	0,48	12	0,04		
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-test	Úroveň významnosti P
Hemicelulóza (%)					
Intercepce	7760,729	1	7760,729	76579,84	***
TM (°C)	554,844	3	184,948	1824,99	***
Chyba	1,216	12	0,101		

TM – termická modifikace, *** - významná, Význam byl přijat na $P < 0,05$.

(Zdroj: vlastní)

Obr. 12 znázorňuje změny v chemickém složení dřeva u jednotlivých složek dřeva a různých teplotách modifikace. Lze pozorovat, že obsah extraktiv, ligninu a celulózy se zvyšováním teploty termické úpravy stoupá. Naopak obsah hemicelulózy a holocelulózy klesá.



Obrázek 12 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty chemických komponentů

(Zdroj: vlastní)

5.3 Maximální rychlost uvolňování tepla ($q(A, \max)$)

Tab. 12 udává průměrné hodnoty maximální rychlosti uvolňování a variační koeficient (VK).

Tabulka 12 Průměrné hodnoty maximální rychlosti uvolňování tepla termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem

Retardér hoření	Teplota TM (°C)	$q(A, \max)$ (kW/m²)	VK (%)
Bez retardéru hoření	20	571,16	24,28
	160	683,95	8,44
	180	657,96	6,35
	210	728,50	22,91
Syntetický retardér hoření	20	404,86	24,78
	160	479,83	9,38
	180	459,00	7,69
	210	509,36	23,81
Přírodní retardér hoření	20	519,10	24,65
	160	616,62	9,12
	180	615,28	3,16
	210	655,06	23,60

TM - termická úprava; VK – variační koeficient.

(Zdroj: vlastní)

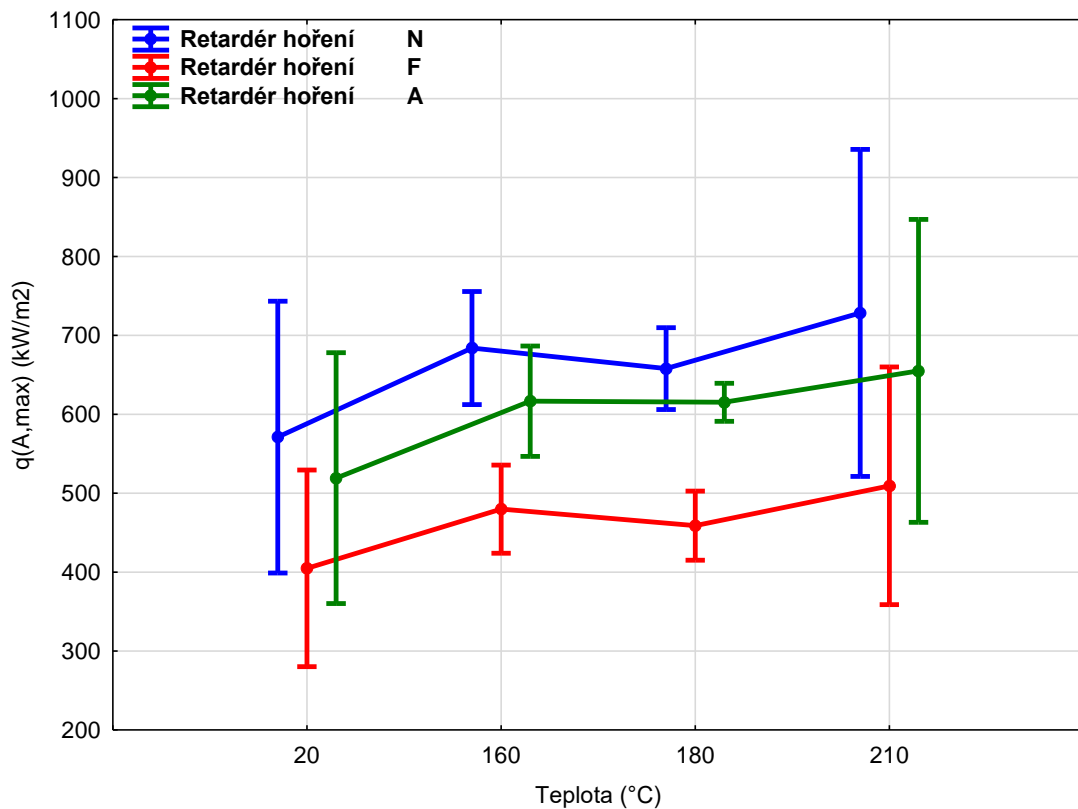
Hodnota „P“ intercepce je rovna nule a je tedy statisticky významná. U retardéru hoření byla dosažena hladina významnosti $P < 0,001$, proto můžeme tvrdit, že je výsledek statisticky velmi významný. Teplota tepelné modifikace dosáhla statisticky střední významnosti, protože $0,001 < P < 0,01$. Tyto faktory mají tedy na maximální rychlost uvolňování tepla vliv. Jediný faktor, který statistické významnosti nedosáhl, je teplota s retardérem hoření, je tomu tak, protože hodnota hladiny významnosti „P“ je vyšší než 0,05.

Tabulka 13 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty maximální rychlost uvolňování tepla

Maximální rychlost uvolňování tepla (kW/m²)					
Faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	19841379	1	19841379	1919,787	0,000000
Teplota (°C)	140275	3	46758	4,524	0,007135
Retardér hoření	409593	2	204797	19,815	0,000001
Teplota x Retardér hoření	5065	6	844	0,082	0,997745
Chyba	496090	48	10335		

(Zdroj: vlastní)

U obr. 13 můžeme na základě hodnoty významnosti „P“ konstatovat, že teplota tepelné modifikace se syntetickým ani přírodním retardérem v závislosti na maximální rychlost uvolňování tepla není statisticky významná. Nejlepší účinek měl syntetický retardér při teplotě 20 °C.



Obrázek 13 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty maximální rychlosti uvolňování tepla

(Zdroj: vlastní)

5.4 Čas při maximální rychlosti uvolnění tepla $q(A, \max)$

V tab. 14 jsou zaznamenány průměrné hodnoty času při maximální rychlosti uvolňování tepla a variační koeficient (VK).

Tabulka 14 Průměrné hodnoty času při maximální rychlosti uvolňování tepla termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem

Retardér hoření	Teplota TM (°C)	Čas při $q(A, \max)$ (S)	VK (%)
Bez retardéru hoření	20	1662,20	8,65
	160	1556,20	18,20
	180	1706,40	2,37
	210	1587,00	19,09
Syntetický retardér hoření	20	1161,06	8,04
	160	1102,32	19,19
	180	1189,55	2,58
	210	1109,68	20,08
Přírodní retardér hoření	20	1509,79	9,23
	160	1406,54	19,71
	180	1599,83	6,27
	210	1427,08	19,85

TM - termická úprava; VK – variační koeficient.

(Zdroj: vlastní)

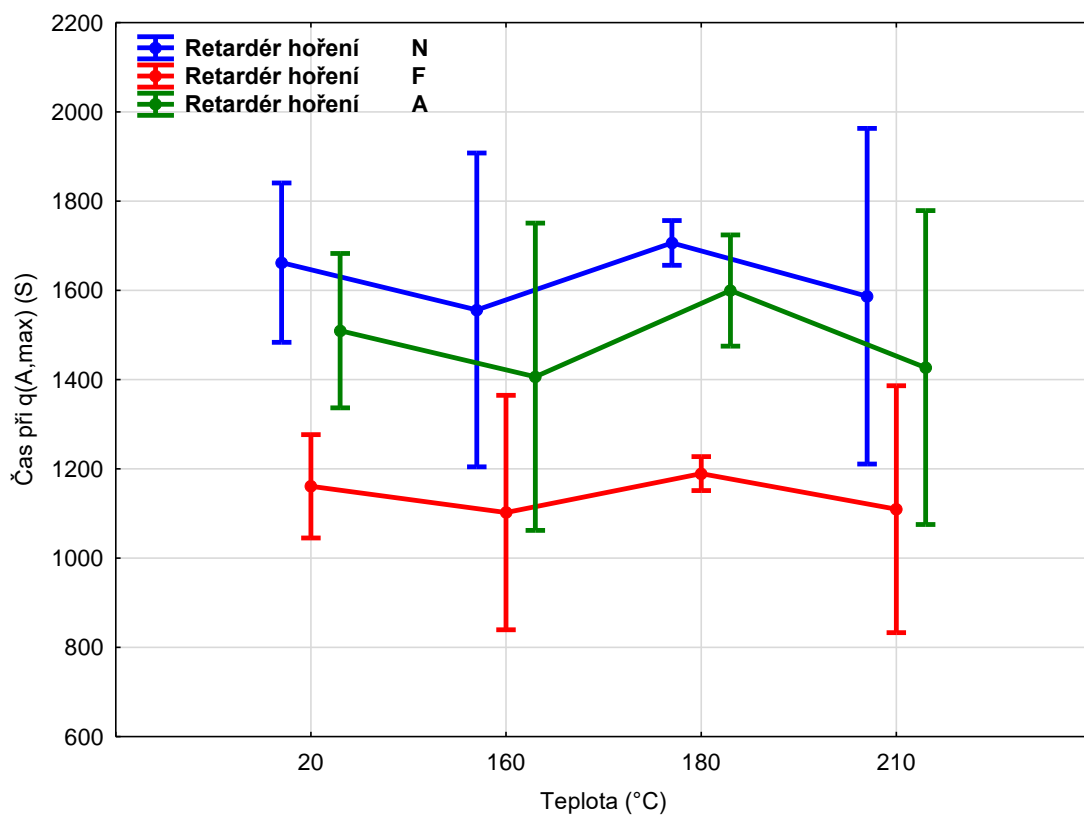
V tab. 15 vidíme, že hodnota hladiny významnosti „P“ se u faktoru retardér hoření a intercepce projevila jako statisticky významná, pozorujeme, že faktor působí. O teplotě termické modifikace lze říci, že hodnota hladina významnosti „P“ je statisticky nevýznamná. Další faktor, který se jeví jako statisticky nevýznamný, je teplota s retardérem hoření, hodnota „P“ překročila 0,05.

Tabulka 15 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty času při maximální rychlosti uvolňování tepla

Čas při maximální rychlosti uvolňování tepla (S)					
Faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	120666944	1	120666944	2985,614	0,000000
Teplota (°C)	195608	3	65203	1,613	0,198595
Retardér hoření	2511981	2	1255990	31,076	0,000000
Teplota x Retardér hoření	17874	6	2979	0,074	0,998310
Chyba	1939974	48	40416		

(Zdroj: vlastní)

Na obr. 14 si lze všimnout, že na základě hodnoty úrovně významnosti „P“ nebyl u přírodního retardéru hoření prokázán statisticky významný účinek faktorů a interakce na hodnoty času při maximální průměrné rychlosti uvolňování tepla. Významnost se nepotvrdila ani u syntetického retardéru hoření. Měl ale největší vliv při všech teplotách termické modifikace v závislosti na čase při maximální rychlosti uvolňování tepla, nejlepších hodnot však dosáhla teplota 210 °C.



Obrázek 14 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty času při maximální teplotě uvolňování tepla

(Zdroj: vlastní)

5.5 Celkové teplo

V tab. 16 se uvádí průměrné hodnoty k charakteristice hoření celkové teplo a variační koeficient (VK).

Tabulka 16 Průměrné hodnoty celkového tepla termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem

Retardér hoření	Teplota TM (°C)	CT (MJ/m²)	VK (%)
Bez retardéru hoření	20	135,78	3,93
	160	145,71	2,98
	180	161,78	3,12
	210	142,50	7,26
Syntetický retardér hoření	20	96,09	3,03
	160	102,22	5,11
	180	112,77	2,84
	210	99,40	6,72
Přírodní retardér hoření	20	123,25	3,14
	160	131,36	4,59
	180	151,70	6,90
	210	127,90	6,81

TM - termická úprava; CT – celkové teplo; CV – variační koeficient.

(Zdroj: vlastní)

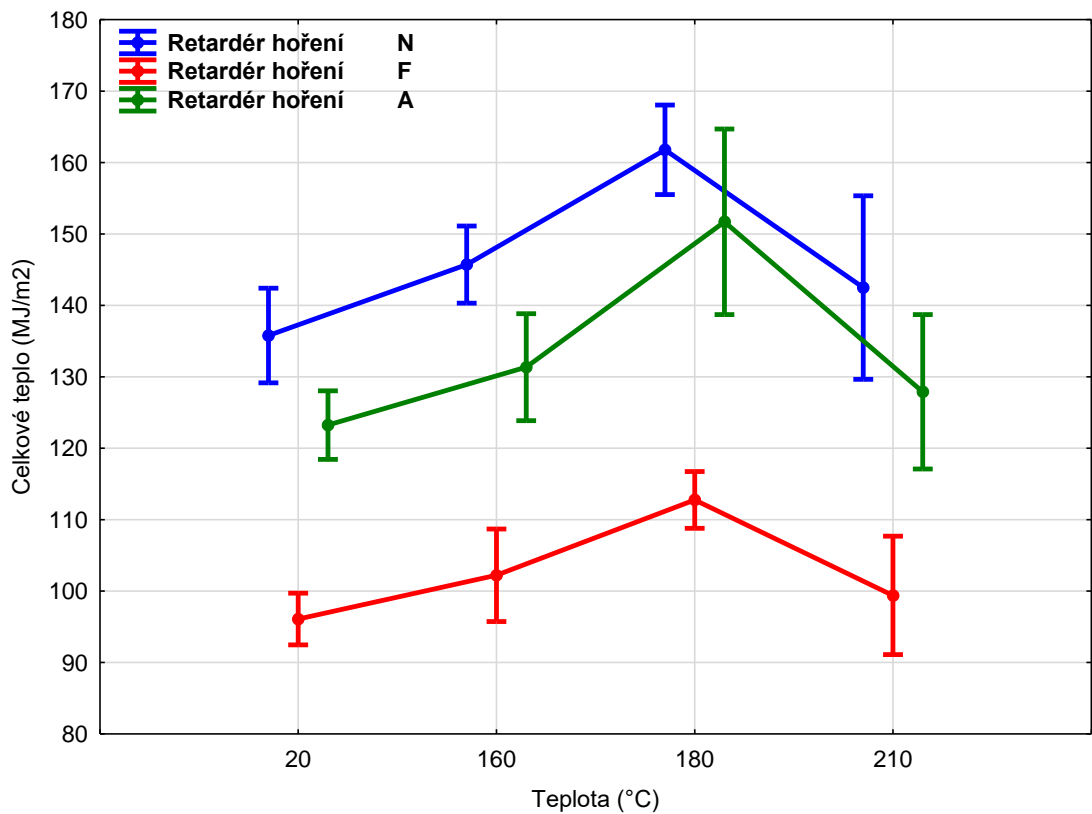
V tab. 17 vícefaktorové analýzy rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty celkového tepla si můžeme všimnout, že všechny faktory, až na interakci teploty tepelné modifikace s retardérem hoření, která neprokázala statistickou významnost, působí. Dopad na celkové teplo mají tedy intercepce, teplota a retardér hoření.

Tabulka 17 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty celkového tepla

Celkové teplo (MJ/m ²)					
Faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	975937,3	1	975937,3	23089,71	0,000000
Teplota (°C)	4725,4	3	1575,1	37,27	0,000000
Retardér hoření	20291,0	2	10145,5	240,03	0,000000
Teplota x Retardér hoření	241,9	6	40,3	0,95	0,466352
Chyba	2028,8	48	42,3		

(Zdroj: vlastní)

Na obr. 15 vidíme, že hodnota významnosti „P“ se u přírodního retardéru hoření a teploty termické modifikace na celkové teplo projevila jako statisticky nevýznamná. Významnost vznikla pouze mezi teplotou 20 °C a teplotou termické úpravy 180 °C. Na hranici statistické významnosti se objevují teploty termické modifikace mezi 160 °C a 180 °C a mezi 180 °C a 210 °C. Syntetický retardér v kombinaci s teplotou v závislosti na celkovém teple měl pozitivní účinek, ale prokázal se jako statisticky nevýznamný. Avšak mezi teplotami 20 °C a 180 °C se statistická významnost projevila. Mezi teplotami 160 °C a 180 °C, 160 °C a 210 °C je vliv faktoru na hranici statistické významnosti. Syntetický retardér při teplotě 210 °C dosáhl nejlepší hodnoty.



Obrázek 15 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty celkového tepla

(Zdroj: vlastní)

5.6 Hmotnost po ukončení testu

V tab. 18 jsou zapsány průměrné hodnoty hmotnosti po ukončení testu a variační koeficient (VK).

Tabulka 18 Průměrné hodnoty hmotnosti po ukončení testu termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem

Retardér hoření	Teplota TM (°C)	HUT (g)	VK (%)
Bez retardéru hoření	20	21,24	10,52
	160	28,70	7,44
	180	31,26	21,43
	210	34,06	27,40
Syntetický retardér hoření	20	15,04	11,22
	160	20,27	8,81
	180	21,76	20,48
	210	24,12	27,02
Přírodní retardér hoření	20	19,21	11,16
	160	26,49	9,83
	180	28,79	24,96
	210	30,96	27,68

TM - termická úprava; HUT – hmotnost po ukončení testu; VK – variační koeficient.

(Zdroj: vlastní)

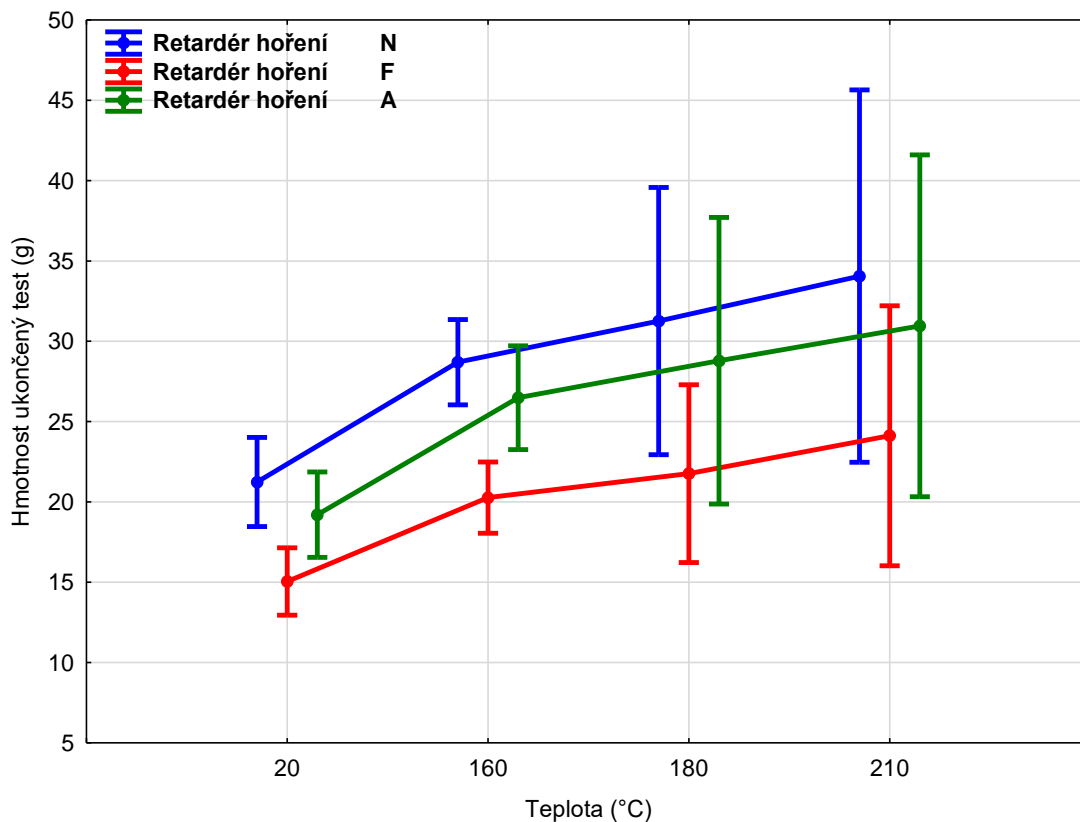
V tab. 19 vidíme že, intercepce je na hladině statistické významnosti $P = 0$. Faktory teplota a retardér hoření zařazujeme do hladiny významnosti $P < 0,001$, vliv faktorů na hmotnost po ukončení testu je statisticky velmi významný. Naopak poslední faktor (teplota s retardérem hoření) se jako statisticky významný neprokázal, protože překročil hodnotu hladiny významnosti $P = 0,05$.

Tabulka 19 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty hmotnosti po ukončení testu

Hmotnost po ukončení testu (g)					
Faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	37978,13	1	37978,13	1315,890	0,000000
Teplota (°C)	1043,97	3	347,99	12,057	0,000005
Retardér hoření	768,53	2	384,26	13,314	0,000025
Teplota x Retardér hoření	23,68	6	3,95	0,137	0,990753
Chyba	1385,34	48	28,86		

(Zdroj: vlastní)

Na obr. 16 lze konstatovat, že faktory podle hodnoty hladiny významnosti „P“ nebyly v závislosti na hmotnost po ukončení testu u syntetického retardéru hoření statisticky významné. Jako statisticky významný se projevil pouze mezi teplotami 20 °C a 160 °C. Přírodní retardér se také projevil jako statisticky nevýznamný. Vliv faktoru je vidět jako u syntetického retardéru mezi teplotami 20 °C a 160 °C.



Obrázek 16 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty hmotností po ukončení testu
(Zdroj: vlastní)

5.7 Úbytek hmotnosti

Tab. 20 udává průměrné hodnoty úbytku hmotnosti tepelně upraveného modřínového dřeva a variační koeficient (VK).

Tabulka 20 Průměrné hodnoty úbytku hmotnosti termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem

Retardér hoření	Teplota TM (°C)	ÚH (g/m²)	VK (%)
Bez retardéru hoření	20	7803,20	5,06
	160	8068,50	2,80
	180	8957,00	4,77
	210	7703,60	8,28
Syntetický retardér hoření	20	5446,22	5,11
	160	5710,91	3,67
	180	6242,06	3,99
	210	5357,97	8,72
Přírodní retardér hoření	20	7038,95	5,95
	160	7273,82	4,43
	180	8080,19	4,80
	210	6915,18	8,08

TM - termická úprava; ÚH – úbytek hmotnosti; VK – variační koeficient.

(Zdroj: vlastní)

Zde v tab. 21 si můžeme všimnout, že intercepce, retardér hoření a teplota termické úpravy staticky působí při $P = 0$. Pokud se podíváme na poslední faktor teplotu tepelné modifikace s retardérem hoření, tak si všimneme, že se vliv na úbytek hmotnosti neprojevil a není statisticky významný.

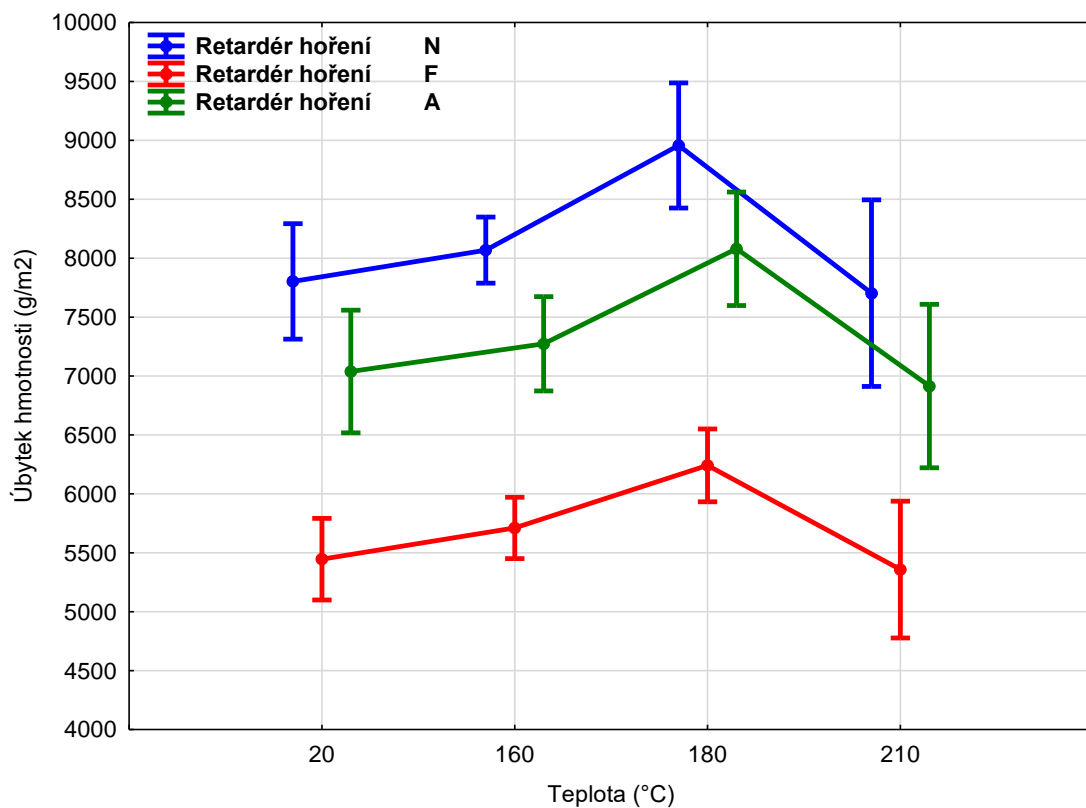
..

Tabulka 21 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty úbytku hmotnosti

Úbytek hmotnosti (g/m ²)					
Faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	2,981982E+09	1	2,981982E+09	18451,21	0,000000
Teplota (°C)	1,110335E+07	3	3,701115E+06	22,90	0,000000
Retardér hoření	6,202653E+07	2	3,101327E+07	191,90	0,000000
Teplota x Retardér hoření	2,659760E+05	6	4,432933E+04	0,27	0,946312
Chyba	7,757493E+06	48	1,616144E+05		

(Zdroj: vlastní)

Na základě hodnot úrovně významnosti „P“ lze říci, že u teploty termické modifikace s přírodním retardérem hoření nebyl prokázán statistický význam. Projevil se však mezi teplotami 20 °C a 180 °C. Jako statisticky nevýznamný se prokázal také syntetický retardér v závislosti na teplotě a úbytku hmotnosti, i když měl kladný vliv při všech teplotách. Statistická významnost se projevila jen mezi teplotami 20 °C a 180 °C. Na obr. 17 můžeme vidět, že vliv faktoru je na hranici statistické významnosti, a to mezi teplotami termické úpravy 180 °C a 210 °C. Nejlepších výsledků dosáhl syntetický retardér hoření při teplotě 210 °C. Dané významnosti jsou zobrazeny na obr. 17.



Obrázek 17 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty úbytku hmotnosti

(Zdroj: vlastní)

5.8 Rychlost úbytku hmotnosti

Tab. 22 uvádí průměrné hodnoty sledované charakteristiky hoření rychlost úbytku hmotnosti a variační koeficient (VK).

Tabulka 22 Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti termicky modifikovaného a nemodifikovaného modřínového dřeva s variačním koeficientem

Retardér hoření	Teplota TM (°C)	RÚH (g/m²s)	VK (%)
Bez retardéru hoření	20	4,52	5,05
	160	6,45	1,87
	180	5,26	2,55
	210	4,48	8,41
Syntetický retardér hoření	20	3,20	5,31
	160	4,53	2,46
	180	3,66	3,48
	210	3,12	9,14
Přírodní retardér hoření	20	4,10	4,75
	160	5,81	3,42
	180	4,93	7,36
	210	4,02	8,00

TM - termická úprava; RÚH – rychlost úbytku hmotnosti; VK – variační koeficient.

(Zdroj: vlastní)

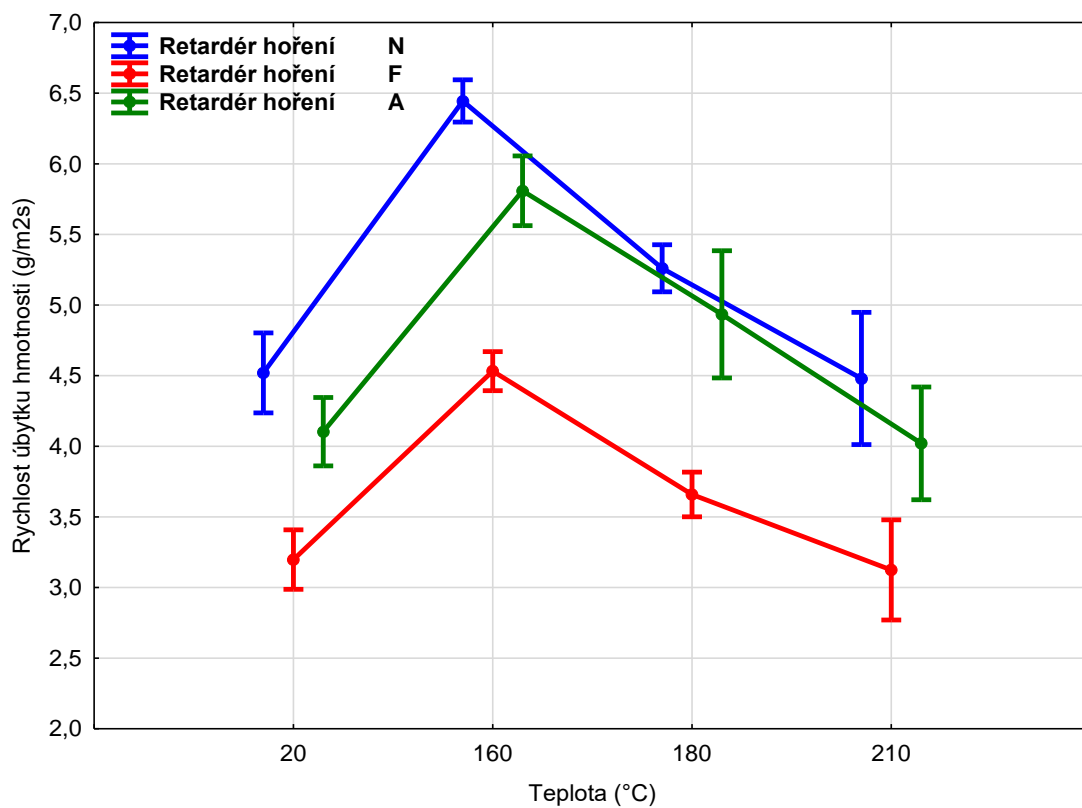
V této tab. 23 můžeme hezky vidět, že první tři faktory (intercepce, teplota a retardér hoření) mají vliv na rychlost úbytku hmotnosti, protože se prokázaly jako staticky významné. Naopak u teploty termické modifikace s retardérem hoření to nelze říci. Faktor překročil hladinu významnosti $P = 0,05$ a je tedy statisticky nevýznamný.

Tabulka 23 Vícefaktorová analýza rozptylu hodnotící vliv jednotlivých faktorů na hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti

Rychlost úbytku hmotnosti (g/m².s)					
Faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	1218,848	1	1218,848	21565,74	0,000000
Teplota (°C)	28,760	3	9,587	169,62	0,000000
Retardér hoření	25,284	2	12,642	223,68	0,000000
Teplota x Retardér hoření	0,693	6	0,116	2,04	0,077755
Chyba	2,713	48	0,057		

(Zdroj: vlastní)

Na obr. 18 na základě hodnoty hladiny „P“ je vidět, že u přírodního retardéru, se neprojevila statistická významnost. Syntetický retardér má pozitivní účinek při všech teplotách (kromě 160) zpracování, ale není statisticky významný mezi účinkem termické modifikace a rychlostí úbytku hmotnosti. Statistický význam se u syntetického retardéru hoření prokázal mezi teplotou 20 °C a teplotou termické modifikace 160 °C a 180 °C, dále je významný mezi teplotami 160 °C a 180 °C. Na hranici statistické významnosti se pohybují teploty 180 °C a 210 °C. V závislosti teploty s retardérem hoření na rychlost úbytku hmotnosti se statistický vliv projevil u teplot mezi 20 °C a teplotami 160 °C a 180 °C, 160 °C a 180 °C i 210 °C, a také 180 °C a 210 °C. Nejlepších výsledků v závislosti na rychlosti úbytku hmotnosti dosáhl syntetický retardér s teplotou termické modifikace 210 °C.



Obrázek 18 Graf 95% intervalů spolehlivosti hodnotící účinek parametru teploty termické modifikace na hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti

(Zdroj: vlastní)

Tab. 24 zobrazuje korelační koeficient, který závisí na chemických komponentech dřeva a vybraných charakteristikách popisujících reakci na oheň. Většina charakteristik má v závislosti na chemické složky nízkou závislost. Střední závislostí se vyznačují všechny chemické komponenty v závislosti na hmotnosti po ukončení testu a extraktiva, lignin, celulóza a hemicelulóza v závislosti na rychlosti úbytku hmotnosti.

Tabulka 24 Korelační koeficient v závislosti chemických složek dřeva na vybrané charakteristiky reakce na oheň

		Chemické složky dřeva (%)				
		Extraktiva	Lignin	Holocelulóza	Celulóza	Hemicelulóza
Charakteristiky reakce na oheň	q(A,max) (kW/m²)	0,27062	0,2727 6	0,2933	0,27113	0,2897
	Čas při q(A,max) (S)	0,0708	0,0314	0,06042	0,0144	0,0490
	Celkové teplo (MJ/m²)	0,0613	0,0281 9	0,0076	0,06522	0,0224
	Hmotnost ukončený test (g)	0,38129	0,4645 1	0,4584	0,45269	0,4602
	Úbytek hmotnosti i (g/m²)	0,1545	0,0729	0,09155	0,0343	0,07748
	Rychlost úbytku hmotnosti i (g/m²s)	0,3711	0,3502	0,28924	0,3468	0,30612

$r = 0$ – nezávislé; $0 < r \leq 0,3$ - nízká závislost; $0,3 < r \leq 0,7$ – střední závislost; $0,7 < r < 1$ - významná závislost; $r = 1$ - vysoká závislost.

(Zdroj: vlastní)

6 Závěr

Cílem práce bylo, vyjma sesumírování literárních poznatků týkajících se reakce na oheň a zápalnosti dřeva a vlastnostech termicky modifikovaného dřeva, zjišťování vlivu teploty termické modifikace na chemické složení dřeva pomocí uvedených metod.

Data nám u chemické analýzy prokázala statisticky významný vliv teploty na obsah složek v modřínu (*Larix*). Zjistilo se, že s navyšující teplotou termické modifikace se obsah extraktiv, ligninu a celulózy zvyšuje. Naopak obsah holocelulózy a hemicelulózy se s rostoucí teplotou snižuje. Dále byla zjištěna závislost chemických složek na vybrané charakteristice popisující reakci na oheň a zapalitelnost dřeva. U všech chemických komponentů v závislosti na hmotnosti po ukončení testu a u ligninu, extraktiv, celulózy a hemicelulózy v závislosti na rychlosti úbytku hmotnosti se prokázala střední závislost. U ostatních dat se projevila pouze nízká závislost.

Dalším cílem bakalářské práce bylo podat výsledky o vybraných charakteristikách, které popisují reakci dřeva na oheň a jeho zapalitelnost, a jejich vlivu na termicky upravené dřevo ošetřené pomocí přírodního antipyrenu Arabinogalaktan a antipyrenu Flamgard na syntetické bázi. Poznatky se podařilo zjistit pomocí měření na kónickém kalorimetru dle normy ISO 566-1:2015, díky kterému se sledoval účinek jednotlivých faktorů, jako je vliv antipyrenů a teplota termické modifikace (nemodifikováno - 20 °C, 160 °C, 180 °C, 210 °C) na vybrané charakteristiky (maximální rychlost uvolňování tepla, čas při maximální rychlosti, hmotnost po ukončení testu, úbytek hmotnosti, celkové teplo a rychlost úbytku hmotnosti). Vzorky byly rozděleny na tři skupiny podle aplikace retardéru hoření (nemodifikované a termicky upravené vzorky bez úpravy retardéru hoření, nemodifikované a termicky upravené vzorky s přírodním antipyrenem a nemodifikované a termicky upravené vzorky se syntetickým antipyrenem), každé zkušební těleso se měřilo po dobu asi 30 min. Z hodnot získaných měření a dalších, které se získaly vážením před a po termické modifikaci, se získaly další fyzikální hodnoty (hustoty).

Prokázalo se výrazné snížení hodnot charakteristik za použití syntetického retardéru hoření Flamgard, měl tedy pozitivní vliv na vybrané charakteristiky. Naopak přírodní retardér neměl takový vliv na zlepšení hodnot vybraných charakteristik jako syntetický. U všech charakteristik reakce dřeva na oheň, až na hmotnost po ukončení testu a maximální rychlost uvolňování tepla, měl nejlepší hodnoty syntetický retardér

v kombinaci s teplotou termické modifikace 210 °C. Bylo zjištěno, že u všech charakteristik popisujících reakci dřeva na oheň a jeho zapalitelnost v závislosti na termické modifikaci s retardérem, neměl ani jeden antipyren statistický význam. Významnost se prokázala pouze u některých charakteristik (celkové teplo, hmotnost po ukončení testu, úbytek hmotnosti a rychlost úbytku hmotnosti) mezi určitými teplotami. O samotném retardéru hoření a teplotě termické modifikace lze říci, že se faktory u všech charakteristik projeví jako statisticky velmi významné.

7 Seznam použité literatury

Literatura

ASEEVA, R. M. – SERKOV, B. – SIVENKOV, A. Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings. Springer Science. Business Media Dordrecht 2014. ISBN 978-94-007-7459-5.

BABRAUAKAS, V. - GRAYSON, S. J. Heat release in fires. Taylor and Francis 1990. ISBN 0-419-16100-7

BARCÍK, Š. – HOMOLA, T.: Vplyv vybraných parametrov na kvalitu obrobeného povrchu při rovinom frézování juvenilního borovicového dřeva. In: Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva, Zvolen, 2004, ISBN 80-228-1385-0

BARNETT, R - JERONIMIDIS, G. 2003. Wood Quality and Its Biological Basis. Boca Raton, FL: Published in the USA/Canada by CRC Press, Biological sciences series (Oxford, England). ISBN 1-84127-319-8

BUČKO, J. a OSVALD, A.: Rozklad dřeva teplem a ohněm. Zvolen. TU, 1998. 100 s.

FREITAG, W. – STOYE, D. Paints, Coatings and Solvents. John Wiley and Sons. 2008. ISBN 978-3-527-61185-0.

HORÁČEK, P. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998. ISBN 80-7157-347-7.

HORKÝ, D. 1987. Hydrotermická úprava a ochrana dřeva. 3. vydání. Zvolen: Vysoká škola lesnická a dřevařská Zvolen. 1987. 272 s.

CHOBOLA, O.: Retardéry hoření dřeva. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita v Ostravě. 2012. 55 s. - Bakalářská práce.

JAVOŘÍK, J.: Porovnání hořlavosti některých domácích dřevin a materiálů na bázi dřeva. MZLU v Brně, 1999. 62 s. – Diplomová práce

KUPILÍK, V. Stavební konstrukce z požárního hlediska. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a. s., 2006. 272 s. ISBN 80-247-1329-2

MATOVÍČ, A, Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva, Vysoká škola zemědělská, Brno 1993. ISBN 80-7157-086-9.

NETOPILOVÁ, M. MATERIÁLY: Stavební materiály. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2004. ISBN 80-86634-27-2.

PTÁČEK, P. Ochrana dřeva. Praha: Grada, 2009. Profi & hobby. ISBN 978-80-247-2326-6.

RADKAU, J., Wood: A History. Polity. 2012. ISBN – 13: 978-0-7456-4688-6.

REINPRECHT, L., Ochrana dřeva: vysokoškolská učebnica. Vo Zvolene: Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-228-1863-6.

REINPRECHT, L., Ochrana dřeva a kompozitov. Zvolen, TU, 1995.

REINPRECHT, L., Procesy degradácie dřeva. 3. vydání Zvolen, TU, 2001.

REINPRECHT, L. - VIDHOLDOVÁ, Z. 2008. Termodrevo – Příprava, Vlastnosti a Aplikácie [ThermoWood – Preparing, Properties and Applications]. Monograph, Technical University in Zvolen, Slovakia (in Slovak).

ŠEFCŮ, O.; VINAŘ, J.; PACÁKOVÁ, M. Metodika ochrany dřeva. Praha: Jalna, 2000. Odborné a metodické publikace (Státní ústav památkové péče). ISBN 80-86234-14-2.

ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a GANDELOVÁ, Libuše. STAVBA DŘEVA – cvičení. Vydání dotisk. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2001. 132 s. ISBN 80-7157-400-7

ŽENATÝ, P.: Protipožární povrchová úprava. Mendelova univerzita v Brně. 2018. 110 s. – Diplomová práce.

Články

AHMED, S.A. – ADAMOPOULOS, S. 2018. Acoustic properties of modified wood under different humid conditions and their relevance for musical instruments. Appl. Acoust. 2018, 140, 92–99.

ASDRUBALI, F. et al. 2017. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. Building and Environment, 114, 307-332.

BARTOŠOVÁ, A. a kol. 2019. New ecological self-extinguishing additives. Advances in Sciences and Engineering, 11 (1), 1-8.

BEALL, F. C. – EICKNER, H. W. 1970. Thermal degradation of wood components: a review of the literature. Forest service research paper.

D'ADAMO, P. 1996. Larch Arabinogalactan is a Novel Immune Modulator. *J. Naturopath. Med* (4);32-39.

DUCHEZ, L. - GUVONNET, R. 1998. Optimization of wood retification by fractional factorial design (in French). *Analisis*. 26:39–43.

ESTEVEZ, B. M. - DOMINGOS, I. J. - PEREIRA, H. M. 2008. Pine wood modification by heat treatment in air. *BioResources* 3, 142. DOI: 10.15376/biores.3.1.142-145.

ESTEVEZ, B. M. - PEREIRA, H. M. 2009. Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources* 4(1), 370-404. DOI: 10.15376/biores.4.1.370-404.

FOWLER, L. C., 1972. Collected summaries of fire research notes. *Science of Fire Safety Science*, 869, 1-1.

FOX, D. M. et al. 2008. Flammability and Thermal Analysis Characterization of Imidazolium – Based Ionic Liquids. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 47, 6327-6332.

GAFF, M. a kol. 2019. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood. *Construction and Building Materials* 200:551-558.

GAŠPAŘÍK, M. et al. 2017. Flammability characteristics of thermally modified oak wood treated with a fire retardant. *BioRes* 2017, 12, 8451-8467.

GÜNDÜZ, G. et al. 2008. The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani black pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. *Bioresource Technology* 99(7), 2275-2280. DOI: 10.1016/j.biortech.2007.05.015.

HALE, M.D. – GHOSH, S. – SPEAR, M. 2005. Effects of artificial uv weathering and soft rot decay on heat treated wood. *International Research Group on Wood Preservation At: India*.

HASANAGIĆ, R. 2019. Thermal modified wood: a critical review. *Revitalization and Modernization of Production, RIM 2019*. At: Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

HILL, C. - ALTGEN, M. - RAUTKARI, L. 2020. Thermal modification of wood— a review: chemical changes and hygroscopicity *J MATER SCI* 56:6581-6614.

KARINKANTA, P. et al. 2018. Fine grinding of wood – overview from breakage to applications. *Biomass and Bioenergy*, 113, 31-44.

KAWAMOTO, H. 2017. Lignin pyrolysis reactions. *Journal of Wood Science* 63 (2), 117-132.

LINDHOLM, J. – BRINK, A. – HUPA, M. 2009. Cone Calorimeter – A Tool for Measuring Heat Release Rat. IFRF – Finn. Flame Res. Comm.

MAYES, D. – OKSANEN, O. 2003. Thermowood handbook, Thermowood, Finnforest, Finland.

MORITZ, M. A. et al. 2012. Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere*, 3 (6), 1-22.

PFRIEM, A. et al. 2005. The use of wood modified by heat-treatment for musical instruments. in: *Wood Modification: Processes, Properties and Commercialisation – 2nd European Conference on Wood Modification*, Göttingen, Germany, pp. 390-397.

POPESCU, M. C. et al. 2011. Evaluation of morphological and chemical aspects of different wood species by spectroscopy and thermal methods. *Journal of Molecular Structure* 988 (1-3):65-72.

RAPP, O.A. - SAILER, M. F., 2001. Oil-heats-treatment of wood – Process and properties. *Drvna Industrija* 52(2):67-70

SAHÍN, H. – KESKÍK, S. M. 2016. The thermal conductivity of solid wood heat-treated using the thermowood method. *International Conference on Material Science and Technology in Cappadocia*. Nevsehir, Turkey.

SAHÍN, H.Í. 2017. Heat Treatment Application Methods and Effects of Heat Treatment on Some Wood Properties. Budapest/Hungary

SANBERG, D. - KUTNAR, A. 2016. Thermally modified timber: Recent developments in Europe and North America. *Wood Fiber Sci.* 48(1), 1-12.

SANDOVAL TORRES, S. et al. 2011. Multiphysics modeling of vacuum drying of wood. *Applied Mathematical modeling*, 35 (10), 5006-5016.

SCHUTYSER, W. et al. 2018. Chemicals from lignin: an interplay of ligninocellulose fractionation, depolymerisation, and upgrading. *Chemical Society Reviews*, 47 (3), 852-908.

SONDEREGGE, W. – NIEMZ, P. 2009. Thermal conductivity and water vapour transmission properties of wood-based materials. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67, 313-321.

VERNOIS, M. 2000. Heat treatment of wood in France – state of the art. Centre Technique du Bois et de l'Ameublement. Paris. France.

VIITANIEMI, P. - JÄMSÄ, S. 1996. Modification of wood with heat treatment. VTT research report publications 814, VTT, Finland, 53 pp (in Finnish).

WANG, J. - COOPER, P. 2007. Fire, flame resistance and thermal properties of oil thermally-treated wood, The International Research Group on Wood Protection, Document no. IRG/WP 07-40361.

YILDIZ, S. – GEZER, E. D. – YILDIZ, U. C. 2006. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. Build Environ 41:1762-1466.

ZÁMOSTNÝ, P. – KURC, L. 2011. Effect of operating conditions and feedstock composition on dendromass pyrolysis. Chemické listy 105(6):458-466.

ZHAO, P. – GUO, CH. – LI, L. Flame retardancy and thermal degradation properties of polypropylene/wood flour composite modified with aluminum hypophosphite/melamine cyanurate. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 135, 3085-3093.

ZOBEL, B. J. - SPRAGUE, J. R. 1998. Juvenile Wood in Forest trees. SpringerVerlag, Berlin, Germany.

Internetové zdroje

ACEPYRIT FORTE. Technický list Protipožární impregnace dřeva. [online]. [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: <https://www.caprocb.cz/acepyrit-forte/>

ANONYMUS. Ochrana dřeva. Hoření dřeva a jeho ochrana proti ohni. [online]. 2005. Sborník přednášek. [cit. 10.12.2020]. Dostupné z: http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdreva/12.pdf

ANONYMUS. Zpracování dřeva. část.2, díl 5., kapitola 1., 2009 [online]. [cit. 10.12.2020, 28.11.2020]. Dostupné z: https://www.dashofer.cz/download/pdf/drv/2_5_1_tepelne_vlastnosti_dreva.pdf

CAPROCB.CZ – ACEPYRIT FORTE. Technický list. Protipožární impregnace dřeva. [online]. [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: <https://www.caprocb.cz/acepyrit-forte/>

ECOCHOICE. The benefits of thermally modified wood. [online]. 2020 [cit. 11.3.2021]. Dostupné z: <https://ecochoice.co.uk/news/blog/item/benefits-of-thermally-modified-wood>

FREWOOD. Změny barvy dřeva při působení vysoké teploty a možnosti jejich využití. [online]. 2019 [cit. 20.10.2020]. Dostupné z: <https://www.freewood.cz/aktuality/zmeny-barvy-dreva-pri-pusobeni-vysoke-teploty-a-moznosti-jejich-vyuziti-8>

FTWA (Finnish ThermoWood Asociation). [online]. ThermoWood. Helsinki: Finnish ThermoWood Asociation, [cit. 20.10.2020]. Dostupné z: https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.kotisivukone.com/tiedostot/thermo_eng.pdf

HOLENDA, T. Požární odolnost dřevostaveb 2. díl – Požadavky na stavební materiály. [online]. 2012 [cit. 11.12.2020]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/pozadavky-na-pozarni-odolnost-drevostaveb>

ITWA (International ThermoWood Asociation). [online]ThermoWood Handbook. [cit.20.10.2020] Dostupné z: <https://pdf.archiexpo.com/pdf/novawood/thermowood-handbook-international-thermowood-association-itwa/149554-263531.html>

IZOLACE-INFO. Třídy reakce na oheň u stavebních materiálů. [online]. 2014 [cit. 9.3.2021]. Dostupné z: <https://www.izolace-info.cz/aktuality/9111-tridy-reakce-na-ohen-u-stavebnich-materialu-a.html#.YHNhBM9xfIW>

IZOSTAV. Plamostop D – AITHON PV33 na dřevo. [online]. 2019 [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: www.izostav.cz/cz/drevo

KOPECKÝ, S. – ŘEPÍK, J. – ŠKODA, J.: Požární ochrana. Časopis 112, ročník XVI, číslo 11/2017. [online]. 2017 [cit. 28.11.2020]. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/casopis-112-rocnik-xvi-cislo-11-2017.aspx?q=Y2hudW09NA%3D%3D>

KOPOS. Třídy reakce na oheň. [online]. [cit. 31.3.2021]. Dostupné z: <https://www.kopos.cz/cs/technicke-informace/tridy-reakce-na-ohen>

MENDELU. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. [online]. 2017 [cit. 8.12.2020]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?opora=554>

NIS. Požární odolnost. [online]. 2017 [cit. 14.3.2021]. Dostupné z: www.n-i-s.cz/cz/pozarni-odolnost-dreva/page/493/

OSVALD, A. – MAKOVICKÁ OSVALDOVÁ, L. Retardačné úpravy horenia dreva. [online]. 2011. [cit. 31.3.2021]. Dostupné z:

<https://www.fbi.uniza.sk/uploads/Dokumenty/weby/rks-archiv/2011/articles/clanky/osvald .pdf>

PLATOWOOD. The platowood cycle. Arnhem [online]. 2020 [cit. 20.10.2020]. Dostupné z: <http://www.platowood.com/>

PLATOWOOD. Industriepark Kleefse Waard. Product information. Arnhem. [online]. 2020 [cit. 20.10. 2020]. Dostupné z: <http://www.platowood.com/>

PROMADUR. Nátěr na dřevo. [online]. 2020 [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: <https://www.promatpraha.cz/cs-cz/products/promadur>

PROKOM. Povrchová úprava materiálu ThermoWood®.[online]. 2020 [cit. 20.10.2020]. Dostupné z: <https://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/212-thermowood-tepelne-upravene-drevo-povrchova-uprava>

RAPP, Andreas a SAILER, Michael [online]. Heat treatment of wood in Germany – state of the art. Hamburg: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft.[online]. 2000 [cit. 20.10.2020]. Dostupné online: <http://www.thermallytreatedwood.com/Library/Technology/Germany.pdf>

SANDAK, J. et al. 2017. Machinability of Minor Wooden Species before and after Modification with ThermoVacuum Technology [online]. [cit. 27.2.2021]. DOI: 10.3390/ma10020121. Dostupné z: www.mdpi.com/1996-1944/10/2/121

STACHEMA. Technický list Flamgard. [online]. 2019 [cit. 14. 12. 2020 a 14.3.2021]. <https://www.stachema.cz/files/files/TL-FLAMGARD.pdf>

URALYX. Reakce organických sloučenin, [online]. [cit. 11.3.2021]. Dostupné z: www.goaml.uralyx.cz

WOLMANIT. Technický leták. [online]. [cit. 14.12.2020]. Dostupné z: <https://www.lesoservis.cz/files/produkty/969technicky-list-cz-wolmanit-cx-8-doc.doc>

Normy

ASTM D1106-96. Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood, ASTM International, West Conshohocken, PA (2013), [10.1520/D1106](#)

ASTM D1107-96. Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood, ASTM International, West Conshohocken, PA (2013), [10.1520/D1107](#)

ČSN 33 2312 ed.2. Elektrické instalace nízkého napětí – Elektrická zařízení v hořlavých látkách a na nich.

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

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

ISO 13061-1:2014. Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens.

ISO 13061-2:2014. Wood-Determination of Density for Physical and Mechanical Tests.

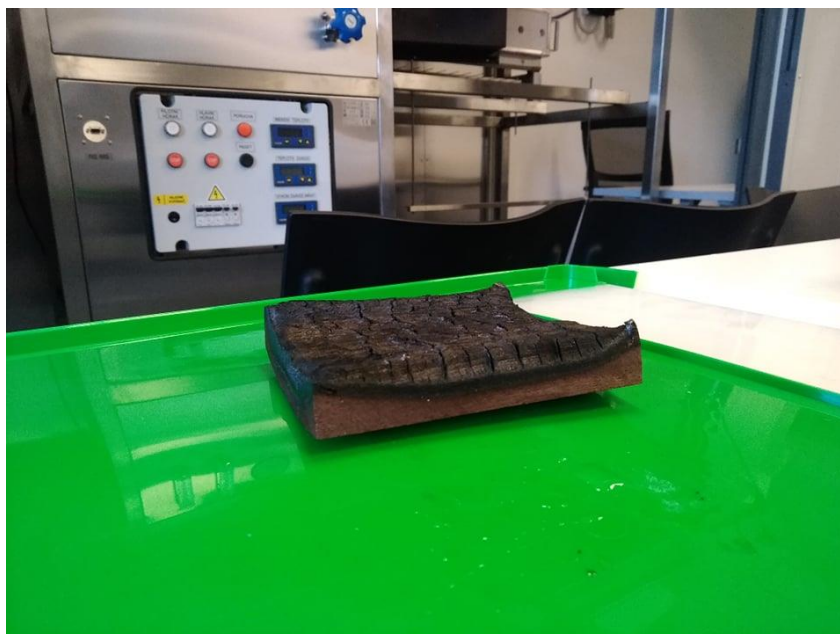
8 Přílohy

Příloha 1 – Obr. 19 Spálený vzorek bez ochrany retardérem hoření.

Příloha 2 – Obr. 20 Spálený vzorek s ochranou syntetickým retardérem hoření – Flamgardem.

Příloha 3 – Tab. 25 Porovnání efektu jednotlivých faktorů používaných v Duncanově testu u sledovaných charakteristik.

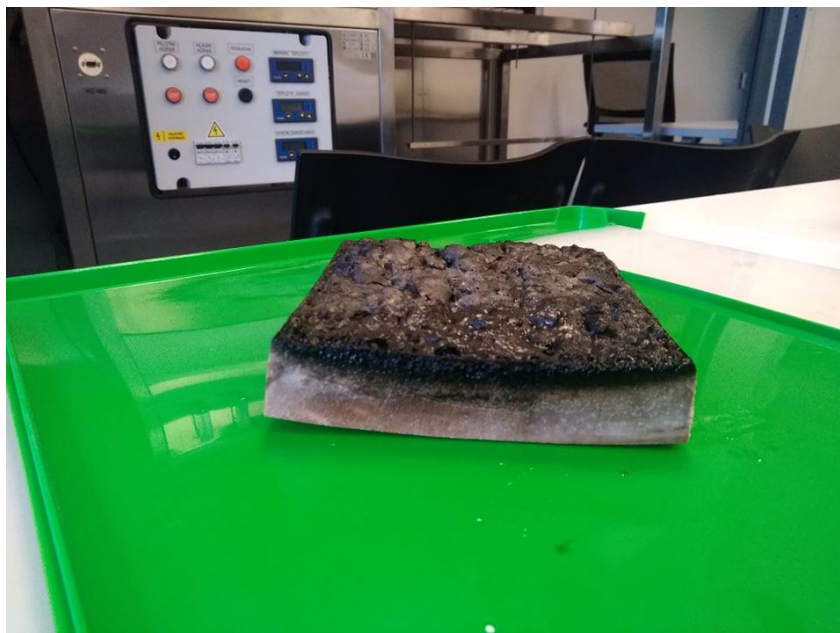
Příloha 1



Obrázek 19 Spálený vzorek bez ochrany retardérem hoření

(Zdroj: vlastní)

Příloha 2



**Obrázek 20 Spálený vzorek s ochranou syntetickým retardérem hoření -
Flamgardem**

(Zdroj: vlastní)

Příloha 3

Tabulka 25 Porovnání efektu jednotlivých faktorů používaných v Duncanově testu u sledovaných charakteristik

q (A, max) (kW/m ²)		Retardér hoření	(1) 571,16	(2) 404,86	(3) 519,10	(4) 683,95	(5) 479,83	(6) 616,62	(7) 657,96	(8) 459,00	(9) 615,28	(10) 728,50	(11) 509,36	(12) 655,06
1	20 °C	N												
2	20 °C	F	0,03											
3	20 °C	A	0,42	0,12										
4	160 °C	N	0,13	0,00	0,03									
5	160 °C	F	0,20	0,28	0,57	0,01								
6	160 °C	A	0,51	0,01	0,17	0,35	0,07							
7	180 °C	N	0,24	0,00	0,06	0,69	0,02	0,55						
8	180 °C	F	0,13	0,40	0,40	0,00	0,75	0,04	0,01					
9	180 °C	A	0,50	0,01	0,16	0,35	0,06	0,98	0,55	0,04				
10	210 °C	N	0,04	0,00	0,01	0,49	0,00	0,13	0,31	0,00	0,13			
11	210 °C	F	0,37	0,14	0,88	0,02	0,65	0,14	0,05	0,47	0,14	0,00		
12	210 °C	A	0,24	0,00	0,06	0,68	0,02	0,55	0,96	0,01	0,56	0,31	0,05	
Čas při q (A, max) (S)		Retardér hoření	(1) 1662,2	(2) 1161,1	(3) 1556,2	(4) 1556,2	(5) 1102,3	(6) 1406,5	(7) 1706,4	(8) 1189,6	(9) 1599,8	(10) 1587,0	(11) 1109,7	(12) 1427,1
1	20 °C	N												
2	20 °C	F	0,00											
3	20 °C	A	0,29	0,02										
4	160 °C	N	0,46	0,01	0,72									
5	160 °C	F	0,00	0,67	0,01	0,00								
6	160 °C	A	0,09	0,07	0,45	0,29	0,04							
7	180 °C	N	0,73	0,00	0,18	0,30	0,00	0,05						

8	180 °C	F	0,00	0,82	0,02	0,01	0,54	0,09	0,00					
9	180 °C	A	0,63	0,00	0,53	0,75	0,00	0,19	0,44	0,01				
10	210 °C	N	0,58	0,00	0,57	0,81	0,00	0,21	0,40	0,01	0,92			
11	210 °C	F	0,00	0,69	0,01	0,00	0,95	0,04	0,00	0,56	0,00	0,00		
12	210 °C	A	0,11	0,06	0,52	0,34	0,03	0,87	0,06	0,08	0,23	0,26	0,03	
Celkové teplo (MJ/m²)		Retardér hoření	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
			135,78	96,09	123,25	145,71	102,22	131,36	161,78	112,77	151,70	142,50	99,395	127,90
1	20 °C	N												
2	20 °C	F	0,00											
3	20 °C	A	0,01	0,00										
4	160 °C	N	0,03	0,00	0,00									
5	160 °C	F	0,00	0,17	0,00	0,00								
6	160 °C	A	0,29	0,00	0,07	0,00	0,00							
7	180 °C	N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
8	180 °C	F	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00					
9	180 °C	A	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,02	0,00				
10	210 °C	N	0,11	0,00	0,00	0,44	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04			
11	210 °C	F	0,00	0,43	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
12	210 °C	A	0,08	0,00	0,26	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Hmotnost po ukončení testu (g)		Retardér hoření	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
			21,240	15,044	19,206	28,700	20,272	26,488	31,260	21,762	28,791	34,060	24,120	30,962
1	20 °C	N												
2	20 °C	F	0,10											
3	20 °C	A	0,58	0,23										
4	160 °C	N	0,05	0,00	0,02									

5	160 °C	F	0,78	0,15	0,76	0,03								
6	160 °C	A	0,17	0,00	0,06	0,52	0,11							
7	180 °C	N	0,01	0,00	0,00	0,50	0,01	0,22						
8	180 °C	F	0,88	0,08	0,50	0,07	0,68	0,20	0,02					
9	180 °C	A	0,06	0,00	0,02	0,98	0,03	0,53	0,50	0,07				
10	210 °C	N	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,05	0,41	0,00	0,16			
11	210 °C	F	0,43	0,02	0,21	0,21	0,31	0,49	0,07	0,49	0,22	0,01		
12	210 °C	A	0,01	0,00	0,00	0,54	0,01	0,24	0,93	0,02	0,53	0,40	0,08	
Úbytek hmotnosti (g/m²)		Retardér hoření	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
			7803,2	5446,2	7038,9	8068,5	5710,9	7273,8	8957,0	6242,1	8080,2	7703,6	5358,0	6915,2
1	20 °C	N												
2	20 °C	F	0,00											
3	20 °C	A	0,01	0,00										
4	160 °C	N	0,30	0,00	0,00									
5	160 °C	F	0,00	0,30	0,00	0,00								
6	160 °C	A	0,05	0,00	0,36	0,01	0,00							
7	180 °C	N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
8	180 °C	F	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00					
9	180 °C	A	0,31	0,00	0,00	0,96	0,00	0,01	0,00	0,00				
10	210 °C	N	0,70	0,00	0,02	0,18	0,00	0,10	0,00	0,00	0,18			
11	210 °C	F	0,00	0,73	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
12	210 °C	A	0,00	0,00	0,63	0,00	0,00	0,19	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	
Rychlost úbytku hmotnosti (g/m²s)		Retardér hoření	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
			4,5200	3,1978	4,1032	6,4450	4,5319	5,8094	5,2600	3,6586	4,9341	4,4800	3,1246	4,0209

1	20 °C	N												
2	20 °C	F	0,00											
3	20 °C	A	0,01	0,00										
4	160 °C	N	0,00	0,00	0,00									
5	160 °C	F	0,94	0,00	0,01	0,00								
6	160 °C	A	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00							
7	180 °C	N	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00						
8	180 °C	F	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00					
9	180 °C	A	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,00				
10	210 °C	N	0,79	0,00	0,02	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,01			
11	210 °C	F	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
12	210 °C	A	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	

(Zdroj: vlastní)