

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘŽSKÁ

**PROTIPOŽÁRNÍ ODOLNOST ROSTLÉHO DŘEVA A DŘEVA TEPELNĚ
UPRAVENÉHO (THERMOWOODU) OŠETŘENÉHO ANTIPYRÉNY NA
PŘÍRODNÍ BÁZI**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:	Dřevařské inženýrství
Pracoviště (katedra/ústav):	Katedra základního zpracování dřeva
Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Konzultant diplomové práce: (nepovinný)	Ing. Hana Čekovská

Praha 2018

Bc. Jakub KUČERA

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Kučera

Dřevařské inženýrství

Název práce

Protipožární odolnost rostlého smrkového dřeva a smrkového dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného antipyrény na přírodní bázi.

Název anglicky

Fire Resistance of solid spruce wood and spruce wood heat-treated (Thermowood) with natural retarder

Cíle práce

Základním cílem práce je zjistit vliv přírodního antipyrénu na vybrané požární charakteristiky a jejich vliv na rostlé a tepelně upravené dřevo.

Metodika

1. Analýza problematiky se zaměřením na:

- vybrané požární charakteristiky rostlého a termicky modifikovaného dřeva,
- vliv přírodního antipyrénu na vybrané požární charakteristiky rostlého a termicky modifikovaného dřeva,
- účinek stupně termické úpravy na vybrané požární charakteristiky.

2. Metodika práce se zaměřením na:

- měření vybraných požárních charakteristik rostlého a termicky modifikovaného dřeva,
- měření vlivu přírodního antipyrénu na vybrané požární charakteristiky rostlého a termicky modifikovaného dřeva,
- hodnocení účinku stupně termické úpravy na vybrané požární charakteristiky.

3. Měření a vyhodnocení

- měření vlivu vybraných faktorů (účinek antipyrénu, stupeň termické úpravy) na sledované požární charakteristiky.

4. Výsledky a diskuse



Doporučený rozsah práce

80

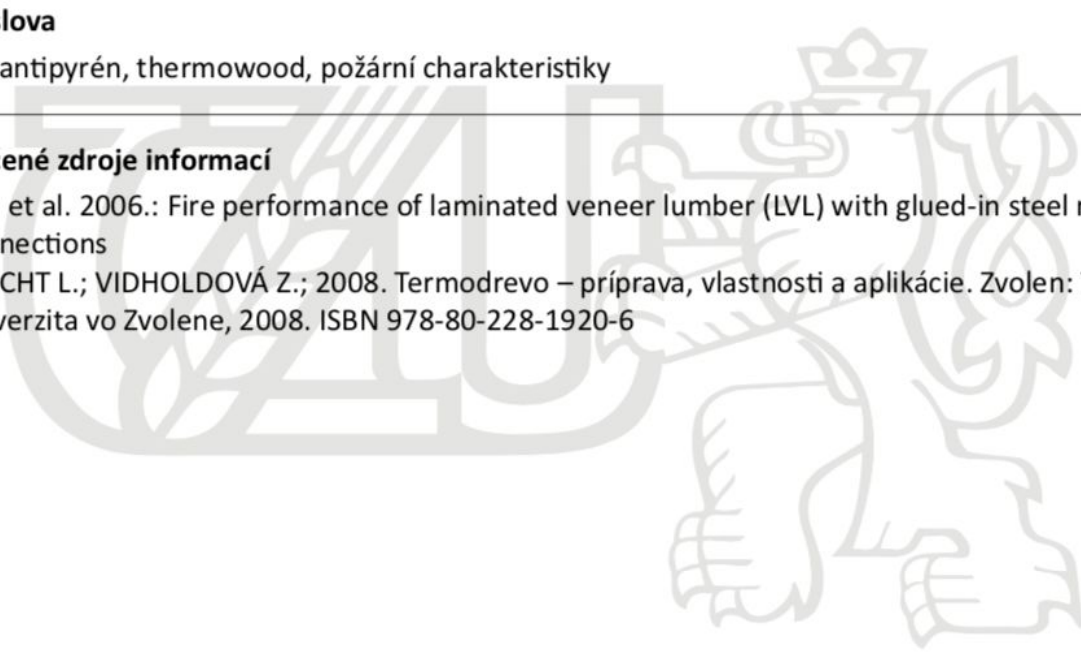
Klíčová slova

přírodní antipyrén, thermowood, požární charakteristiky

Doporučené zdroje informací

Park, JS., et al. 2006.: Fire performance of laminated veneer lumber (LVL) with glued-in steel rod connections

REINPRECHT L.; VIDHOLDOVÁ Z.; 2008. Termodrevo – příprava, vlastnosti a aplikace. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6



Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

Ing. Hana Čéková

Elektronicky schváleno dne 20. 11. 2017

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 5. 2. 2018

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 18. 04. 2018

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Protipožární odolnost rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (THERMOWOODU) ošetřeného antipyrény na přírodní bázi“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milanem Gaffem, PhD., a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze, dne

.....

Jakub Kučera

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval mému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za jeho odborné, věcné rady, konzultace, trpělivost a věnovaný čas. Dále bych rád poděkoval panu profesorovi Antonu Osvaldovi a paní Ing. Haně Čékovské, PhD., kteří se mi věnovali při výzkumné práci, dali mi cenné rady a doporučili užitečné zdroje, ze kterých jsem mohl čerpat pro zpracování mé diplomové práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za jejich podporu a motivaci. Přátelům a kolegům, kteří měli trpělivost a poskytovali mi nepřetržitou podporu. Zvláště bych pak rád poděkoval paní magistře Natálii Pecárové, za její lingvistické znalosti a stylistický cit.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá protipožární odolností rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (THERMOWOODU) ošetřeného antipyrény na přírodní bázi. Testovaným typem dřeva byl smrk, který byl reprezentován úbytkem hmotnosti, rychlostí hoření, maximální rychlostí hoření, časem potřebným k dosažení maximální rychlosti hoření a poměru maximální rychlosti hoření. Experimentální práce proběhla na dvou skupinách testovaných vzorků. První skupinu tvořily vzorky rostlého dřeva bez termické modifikace. Druhá skupina se skládala ze vzorků termicky modifikovaného dřeva při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C. Jednotlivé skupiny se ještě dále dělily, a to na podskupinu, která nebyla ošetřena retardérem a podskupinu, která byla ošetřena retardérem hoření na přírodní bázi. Jak je zmíněno v názvu této odborné práce, tak jsme jako retardér na přírodní bázi zvolili arabinogalaktán, který doposud jako složka antipyrénu nebyla použita.

Vzhledem k výsledkům z experimentu vyplývá, že úprava dřeva antipyrénem na přírodní bázi má pozitivní vliv na jeho požární odolnost. Dále má vliv na pozvolný nárůst doby pro dosažení rychlosti hoření a maximální doby hoření. Čas na dosažení maximální rychlosti hoření dřevěného elementu se zvyšoval, což ukazuje na pozitivní trend, který se projevil jak u vzorků s termickou modifikací i bez ní. Díky těmto pozorováním můžeme konstatovat, že se termicky modifikované dřevo po aplikaci antipyrénu na přírodní bázi přiblížilo a v některých sledovaných faktorech i předčilo rostlé dřevo z hlediska požární odolnosti.

Klíčová slova:

Přírodní antipyrén, thermowood, požární charakteristiky

Abstract

This thesis deals with the fire resistance of wood and heat treated wood (THERMOWOODU) treated natural flame retardant. The type of wood tested was spruce, which was represented by weight loss, burning rate, maximum burning rate, time required to achieve maximum burning rate and maximum burning rate. Experimental work was carried out on two groups of tested samples. The first group consisted of samples of grown wood without thermal modification. The second group consisted of thermally modified wood samples at 160 ° C, 180 ° C and 210 ° C. Individual groups were further subdivided into a subgroup not treated with a retarder and a subgroup treated with a natural-based flame retardant. As mentioned in the title of this work, we have chosen arabinogalactan as a retarder on a natural basis, which has not yet been used as a component of fire retardants.

Based on the results of the experiment, wood treatment with natural flame retardant on a natural basis has a positive effect on its fire resistance. It also affects the gradual increase in the time to reach the burn rate and the maximum burning time. The time to reach the maximum burning rate of the wood element has increased, indicating a positive trend, which was manifested both in and without thermal modification. Thanks to these observations, it is possible to state that the thermally modified wood after natural flame retardant application has approached and, in some of the factors observed, the wood overcomes the fire resistance.

Key words:

Natural flame retardant, thermowood, fire characteristics

OBSAH

ÚVOD	14
CÍL PRÁCE.....	16
ANALÝZA LITERÁRNÍCH POZNATKŮ K PŘEDMĚTNÉ	
PROBLEMATICE.....	17
1 Ochrana dřeva proti ohni.....	17
1.1 Požární odolnost dřeva	17
1.2 Zapalitelnost a hořlavost dřeva	18
1.3 Historie přípravků zvyšujících požární odolnost	22
1.4 Přípravky na zvýšení požární odolnosti v současnosti.	23
1.4.1 Konstrukční ochrana dřeva proti ohni.....	23
1.4.2 Chemická ochrana dřeva proti ohni	24
1.4.3 Retardéry hoření.....	25
1.4.4 Retardéry hoření v historii.....	25
1.4.5 Rozdělení retardérů hoření	26
1.4.6 Přírodní retardér hoření – Arabinogalaktan.....	28
1.4.7 Syntetický retardér hoření – Flamgard Transparent	30
1.4.8 Použití retardérů hoření na rostlé dřevo	31
1.4.9 Použití retardérů hoření na termicky upravené dřevo (thermowood).....	31
2 Dřevo	33
2.1 Dřevo smrk (<i>Picea abies</i> L.) - obecná charakteristika	33
2.1.1 Makroskopická stavba smrkového dřeva (<i>Picea abies</i> L.).....	35
2.1.2 Mikroskopická stavba smrkového dřeva (<i>Picea abies</i> L.)	35
2.1.3 Chemické složení dřeva.....	36
2.1.4 Fyzikální vlastnosti smrkového dřeva.....	36
2.1.5 Mechanické vlastnosti smrkového dřeva	37
3 Modifikace dřeva	39
3.1 Způsoby modifikace dřeva.....	39
3.2 Termická modifikace dřeva	40
3.2.1 Výrobní proces Thermo Woodu	42
3.3 Charakteristika termicky (tepelně) upraveného dřeva.....	44
3.3.1 Fyzikální vlastnosti termicky (tepelně) modifikovaného dřeva	45
3.3.2 Mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.....	47

4 Požární testování.....	50
4.1 Současné platné ČSN	50
4.2 Reakce dřeva thermowood na hoření	52
4.2.1 Chemické reakce vznikající vlivem tepelného působení	55
4.2.2 Chemické změny hlavních složek dřeva při působení tepla.....	56
5 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE.....	59
5.1 Metody výzkumu.....	61
5.2 Vyhodnocení naměřených dat.....	63
6 VÝSLEDKY A DISKUSE	65
6.1 Zpracování výsledků v softwaru Statistica 12	65
6.2 Porovnání a zhodnocení experimentálně získaných dat	65
6.2.1 Úbytek hmotnosti.....	65
6.2.2 Rychlost hoření	67
6.2.3 Maximální rychlost hoření.....	69
6.2.4 Poměr maximální rychlosti hoření.....	70
6.2.5 Doba k dosažení maximální rychlosti hoření	71
6.3 Zařazení jednotlivých vzorků dřeva do příslušných stupňů hořlavosti.....	74
ZÁVĚR.....	76
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	78
PŘÍLOHY.....	87

Seznam ilustrací

Obr. 1. Příklad požárního obkladu sádrokartonovými deskami od firmy RIGIPS (Rigips, a.s., 2017)	24
Obr. 2. Reakce retardéru při vystavení otevřenému plameni (intumescentní retardér) (Osvald <i>et al.</i> 2009).....	28
Obr. 3. Chemický vzorec arabinogalaktanu (Arabinogalaktan 2017).....	29
Obr. 4. Radiální řez – smrk obecný (Jehličnaté dřeviny, 2014)	34
Obr. 5. Mikroskopické zobrazení pryskyřičných kanálků u smrkového dřeva (tangenciální řez-zvětšeno 100x) (Zeidler and Böhm 2007).....	36
Obr. 6. Thermowood – fasádní a terasový profil (DŘEVĚNÁ FASÁDA A TERASY Z MASIVU -ThermoWood, 2015)	42
Obr. 7. Postup výroby termicky upraveného dřeva (ThermoWood) (dřevěné fasády a terasy z masivu-ThermoWood 2015).....	43
Obr. 8. Blokové schéma testovaných dřevěných vzorků	59
Obr. 9. Zkušební tělesa (S-210, S-180, S-160 a S-20)	60
Obr. 10. Rozměry zkušební tělesa pro použití při testování	61
Obr. 11. Schéma zařízení na test hořlavosti podle ČSN (ČSN 73 0862, 2003)	63
Obr. 12. Závislost úbytku hmotnosti (%) na tepelné modifikaci (600 s) u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření	67
Obr. 13. Závislost rychlosti hoření (% \cdot s $^{-1}$ x 10 $^{-5}$) na tepelné modifikaci (600s) u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření	68
Obr. 14. Závislost maximální rychlosti hoření (% \cdot s $^{-1}$) na tepelné modifikaci (za 600s) u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření	70
Obr. 15. Závislost poměru maximální rychlosti hoření (%) na tepelné modifikaci za 600s u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření ..	71
Obr. 16. Závislost doby k dosažení maximální rychlosti hoření (s) na tepelné modifikaci (°C) u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření.....	73

Seznam tabulek

Tab. 1. Odolnost smrkového dřeva proti vzplanutí při různých teplotách (orientační hodnoty) (NIS 2017)	18
Tab. 2. Třídy hořlavosti dle ČSN 73 0862 (Husek 2006)	19
Tab. 3. Vztah mezi požadavky stupně hořlavosti a třídami reakce na oheň dle ČSN 33 2312 ed. 2. (KOPOS 2017).....	19
Tab. 4. Příklady naměřených hodnot rychlosti šíření ohně (Anonymus 2017)	21
Tab. 5. Rychlost hoření tuhých materiálů (Bučko and Osvald 1998)	21
Tab. 6. Základní mechanické vlastnosti smrkového dřeva při vlhkosti 12 % a vlhkosti větší než 30% (Požgaj <i>et al.</i> 1997)	38
Tab. 7. Vstupní technologické parametry a proces termické modifikace	60
Tab. 8. Průměrné hodnoty hustoty zkušebních vzorků	61
Tab. 9. Rozdělení do stupňů hořlavosti.....	64
Tab. 10 . Úbytek hmotnosti (%).....	65
Tab. 11. Rychlost hoření (%.s-1 x 10-5) za 600 s.....	67
Tab. 12. Maximální rychlost hoření (%.s-1) za 600s	69
Tab. 13. Poměr maximální rychlosti hoření (%) za 600 s	70
Tab. 14. Doba k dosažení maximální rychlosti hoření (s).....	72
Tab. 15. Hodnoty naměřené pro jednotlivé veličiny hoření s variačním koeficientem ..	74
Tab. 16. Porovnání efektu individuálních faktorů používaných v Duncan Testu u sledovaných charakteristik	88

Seznam zkratk a značek

min.	minuta, 60 sekund
min.	minimálně
max.	maximálně
°C	stupně Celsia
g/m ²	gramů na metr čtverečný (hustota)
cm.min ⁻¹	centimetr za minutu (rychlost odhořívání dřevní hmoty)
kg.m ³	kilogram na metr krychlový
mm	milimetr
s	sekunda
%	procentuální vyjádření
Q	uvolněné teplo z degradovaného materiálu
m ³	metr krychlový
tab.	tabulka
obr.	obrázek
a.s.	akciová společnost
hod.	hodina (60 minut)
kW	kilowatt (jednotka výkonu), 10 ³
eq.	výpočetní vzorec
VVÚD	Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, s.p.
NIS	Nábytkářský informační systém
ČSN	České technické normy
str.	stran

ÚVOD

Dřevo je v dnešní době jednou z nejvíce expanzivních hmot na trhu. Historicky se jedná o jeden z nejpoužívanějších a pocitově nejpříjemnějších materiálů, jaký se kdy používal. Dnes je dřevo z pohledu truhlářského, tesařského a stavařského velice oblíbeným materiálem díky svým přednostem, dostupnosti, ekologičnosti a hlavně estetičnosti. Právě poslední zmíněná přednost tohoto materiálu se v posledních letech výrazným způsobem podílela na odbourání trendu, který byl na vzestupu v druhé polovině minulého století, a to nahrazení dřeva jinými materiály z důvodu nevyhovujících vlastností.

K tomuto trendu přispívá i několika-letá tendence zlepšování jeho mechanicko-fyzikálních vlastností například tím, že se termicky upravují jeho parametry, aby bylo odolnější vůči biotickým činitelům a lépe odolávalo povětrnostním vlivům.

Přestože je dřevo jedním z pocitově nejpříjemnějších materiálů, tak stále přetrvává nedůvěra v jeho vlastnosti. Dnešní společnost má stále hluboce zakořeněno vnímat dřevo jako materiál, který při požáru ztrácí svou pevnost, rychle hoří, degraduje vlivem působení biotických škůdců a podléhá povětrnostním vlivům. Požární odolnost je proto již mnoho let předmětem zkoumání a díky výsledkům z výzkumů je možné zápalnost a hoření dřeva v dnešní době usměrnit a řídit ji. Kombinací úprav je možné dosáhnout změn v četnosti a variability užívání dřeva v dnešní společnosti.

V této práci se zabýváme jedním z mnoha experimentálních šetření, a to užitím antipyrénu neboli retardéru hoření, který svou aplikací přispívá k ochraně dřeva. V povědomí široké veřejnosti není termín retardér tolik rozšířený, pouze v jistých kruzích vyvolává matnou vzpomínku o tom, že se jedná o specifické nátěry, které pomáhají ochránit dřevěnou konstrukci před účinky hoření. Nicméně i přes širokou škálu využití, zejména pro zanechání transparentnosti dřeva, se v dnešní době antipyrény netěší takové oblibě, jako třeba zvýšení ochrany dřeva pomocí obložení konstrukce deskami.

V dnešní době se využívají retardéry syntetické a nejvíce pak antipyrén Flamgard Transparent. My jsme se rozhodli v této práci posoudit účinky aplikovaného arabinogalaktánu, jakožto retardéru, který splňuje rozšířený trendu v otázce ekologie, jeho těžba a složení je šetrnější k přírodě. Hlavní složka tohoto antipyrénu – Arabinogalaktán – se totiž těží z modřínu a není tedy uměle vytvořen. Vhodným

poměrem a koncentrací vznikla látka, která, jak nám ukázaly výsledky v experimentální části, poskytuje velice dobrou ochranu pro dřevěné konstrukce. Věřím, že díky této práci, kde se píše o novém retardéru, zkoumá se jeho vliv na rostlé dřevo a termicky upravené dřevo vzhledem k jejich požární odolnosti a popisuje se i historie ochrany dřeva a výhody aplikace retardérů, dojde k rozšíření povědomí o těchto materiálech. Tyto materiály mohou zlepšit náš pocit bezpečí a vyzdvihnout na první pohled materiálovou strukturu, jakou o dřeva požadujeme.

CÍL PRÁCE

Základním cílem práce je zjistit vliv přírodního antipyrénu na vybrané požární charakteristiky a jejich vliv na rostlé a tepelně upravené dřevo.

Metodika práce:

1. Analýza problematiky se zaměřením na:
 - ✚ vybrané požární charakteristiky rostlého a termicky modifikovaného dřeva,
 - ✚ vliv přírodního antipyrénu na vybrané požární charakteristiky rostlého a termicky upraveného dřeva,
 - ✚ účinek stupně termické úpravy na vybrané požární charakteristiky

2. Metodika experimentální práce zaměřená na:
 - ✚ měření vybraných požárních charakteristik rostlého a termicky modifikovaného dřeva,
 - ✚ měření vlivu přírodního antipyrénu na vybrané požární charakteristiky rostlého a termicky modifikovaného dřeva,
 - ✚ hodnocení účinku stupně termické úpravy na vybrané požární charakteristiky.

3. Měření a vyhodnocení:
 - ✚ měření vlivu vybraných faktorů (účinek antipyrénu, stupně termické úpravy) na sledované požární charakteristiky.

ANALÝZA LITERÁRNÍCH POZNATKŮ K PŘEDMĚTNÉ PROBLEMATICE

1 Ochrana dřeva proti ohni

Problematika zažehnutí ohně a následující vznik požáru u dřevěných konstrukcí je jednou z nejvíce diskutovaných otázek u volby materiálu. Proto se na vysušené dřevo aplikují ochranné prostředky, které jsou v následujících podkapitolách popsány. Tedy prostředky pro ochranu dřeva pro odolnost dřeva proti požáru

- Definice požáru

Požár je nežádoucí hoření, kdy dochází k usmrcení nebo zranění osob či zvířat, ke škodám na materiálních hodnotách nebo životním prostředí a nežádoucí hoření, při kterém byly osoby, zvířata, materiálové hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy ohněm.

- Definice ohně

Oheň je člověkem řízené a určitým prostředím ohraničené hoření.

- Definice hoření

Hoření je relativně rychlý řetězový autokatalytický reakční mechanismus spojený s uvolněním tepelné energie, který může být provázený výrazným světelným efektem (Kvarčák 2005).

1.1 Požární odolnost dřeva

Požární odolnost je definována jako schopnost objektu, konstrukce zachovat po stanovenou dobu požadovanou stabilitu (NIS 2017).

Požární odolnost je schopnost zkušebního vzorku odolat po určenou dobu požáru nebo poskytnout ochranu před požárem (ČSN EN ISO 13943 – 73 0801 2011).

Požární odolnost je určena, jedná se o vypočtený ukazatel materiálu, či konstrukce odolat teplotám, které vznikají při požáru, aniž by došlo ke ztrátě únosnosti, porušení celistvosti, stability, nebo překročení mezních teplot (VVÚD Praha 2005).

**Tab. 1. Odolnost smrkového dřeva proti vzplanutí při různých teplotách
(orientační hodnoty) (NIS 2017)**

Teplota (C°)	Doba potřebná pro vzplanutí
	Smrk
	Doba potřebná pro vzplanutí (min.)
180	40,0
200	19,6
225	8,3
250	5,3
300	2,1
350	1,0
430	0,3

1.2 Zapalitelnost a hořlavost dřeva

Klasifikace rostlého dřeva je formulována jako „obtížně zápalné“ a rychlost šíření plamene je u dřeva přijatelně nízká (Vaverka *et al.* 2008).

Z důvodu hořlavosti a zápalnosti se dřevo a materiály na bázi dřeva například ve stavebnictví nepoužívají, v masivnějším měřítku. Do dnešního dne neexistuje žádná ochrana, která svým použitím udělala ze dřeva nehořlavý materiál. Nicméně proti působení ohně a sálavého tepla lze dřevo již relativně dobře ochránit. Zápalnost dřeva snížíme tím, že zmírníme jeho vznětlivost a hořlavost dřeva změním aplikací vhodného ochranného prostředku (Potůček 2017).

Snadná zápalnost a hořlavost dřeva je zapříčiněna skutečností, že dřevo je organická hmota složená převážně z uhlíku (50%), kyslíku (42%) a vodíku (5%). Tím pádem při hodnocení požárních rizik dojdeme k výsledku, že ze tří základních podmínek pro vznik hoření a požáru (přítomnost hořlaviny, kyslíku a dostatečná zápalná teplota) jsou v případě dřevěných konstrukcí vždy splněny, alespoň dvě. Proto byl v minulých letech oficiálně zastáván trend toho, že dřevo je nevhodný stavební

materiál a jeho používání ve stavebnictví je z hlediska požárního nebezpečí rizikové (Kupilík 2006).

Tab. 2. Třídy hořlavosti dle ČSN 73 0862 (Husek 2006)

Označení stupně hořlavosti		Hodnota Q
A	nehořlavé	do 50
B	nesnadno hořlavé	nad 50 do 150
C1	těžce hořlavé	nad 150 do 300
C2	středně hořlavé	nad 300 do 600
C3	lehce hořlavé	nad 600

Tab. 3. Vztah mezi požadavky stupně hořlavosti a třídami reakce na oheň dle ČSN 33 2312 ed. 2. (KOPOS 2017)

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

Na stupeň hořlavosti dřeva a materiálů na jeho bázi mají vliv kromě vlastních chemických složení dřeva, i další faktory, zejména pak tyto:

- vnitřní struktura dřeva-pórovitost, hustota, anatomická skladba, podíl jarního a letního dřeva, propustnost pro plyny a kapaliny, měrné teplo a tepelná vodivost, tedy zjednodušeně řečeno druh dřeva,
- geometrie konstrukce-velikost, tvar, poměr plochy povrchu k objemu, podíl čelních a bočních ploch, ostré hrany, drsnost povrchu, trhliny, suky a podobné vady dřeva,

-
- přítomnost pomocných látek – lepidel, retardérů hoření, nátěrových hmot, biocidů atd. a jejich požárně technické vlastnosti,
 - parametry okolní atmosféry-relativní vlhkost vzduchu (a s ní související vlhkost dřeva), teplota, rychlost proudění vzduchu, skladba vzduchu (obsah kyslíku, oxidu uhličitého atd.) (Anonymus 2017).

Je ale nutné zdůraznit, že se dosud žádným chemickým prostředkem (nátěrem či hloubkovou impregnací) nepodařilo prodloužit požární odolnost dřevěné konstrukce o více jak 10 až 15 minut (NIS 2017).

Snížení hořlavosti dřeva, oddálení jeho vznětlivosti, zpomalení rychlosti hoření a šíření plamene po povrchu je možné několika způsoby:

- a) chráněním dřeva před zahřátím na vyšší teplotu obalem z inertních tepelně izolujících hmot, které oddalují tvorbu nehořlavých plynů -např.: obložení, nehořlavými hmotami s nízkou tepelnou vodivostí (písek, škvára, popel, štěrk, stavební rum atd.), omítnutí vápennou maltou s přídavkem experlitu, obalení minerální plstí (čedičovou nebo minerální vatou) nebo použitím změnitelných nátěrových hmot s retardéry hoření.

U dveří jsou např. používány zpěnitelné pásy, které zamezují proudění vzduchu a omezují rychlost hoření.

- b) zředěním hořlavých plynů nehořlavými plyny uvolněnými ze speciální impregnace dřeva chemickými látkami. Tyto látky se rozkládají na nehořlavé plyny, které ředí pyrolýzní plyny, a proto nemohou vznikat zápalné a hořlavé směsi. Po dobu rozkládání těchto látek je spotřebováno teplo, které brání zahřátí a tepelnému rozkladu dřeva. Takovými látkami jsou amonné soli (fosforečnany, síran, halogenidy, boritany) a sloučeniny obsahující krystalickou (vodu borax, soda, kamenec hlinito-draselný, chlorid vápenatý aj.),
- c) podpořením tvorby izolační zuhelnatělé vrstvy. Zuhelnatění povrchové vrstvy dřeva zpomaluje postup hoření a může přivodit i jeho přerušování. Chemické sloučeniny podporují tvorbu dřevěného uhlí. Jedná se především o látky, které obsahují volné anorganické kyseliny, kyselé soli nebo volné anhydridy kyselin, které vznikají při rozkladu těchto látek teplem. Do této skupiny látek patří především amonné sloučeniny

(fosforečnany, halogenidy, síran), kyselina boritá a boritany (Anonymus 2017).

Dřevěné konstrukce a materiál na bázi dřeva chránit například podstatným zpomalením rychlosti šíření plamene po povrchu dřeva (VVÚD Praha 2005).

Rychlost šíření plamene po povrchu je určena indexem šíření plamene po povrchu [mm/min.] (Hejtmánek *et al.* 2016). Rychlost roste s obsahem pryskyřic, klesá se narůstajícím objemem vlhkostí a objemovou hmotností (měkké x tvrdé dřevo). Tato rychlost se v České republice zkouší a ověřuje metodou popsanou v ČSN 73 0822-*Požárně technické vlastnosti hmot. Šíření plamene po povrchu stavebních hmot.*

Výsledkem zkoušky je rychlost šíření ohně (požáru) v [cm. min⁻¹]. Snížení rychlosti šíření ohně vlivem retardérů hoření se zjišťuje na smrkovém dřevě tl. 10-30 mm.

Tab. 4. Příklady naměřených hodnot rychlosti šíření ohně (Anonymus 2017)

Příklady zjištěných hodnot rychlosti šíření ohně	
Druh ochrany	Rychlost šíření ohně [cm. min⁻¹]
nechráněné smrkové dřevo	18,5
dřevo chráněné Pyronitem (200 g/m ²)	8,2
dřevo chráněné Flamgardem (500 g/m ²)	5,8

Tab. 5. Rychlost hoření tuhých materiálů (Bučko and Osvald 1998)

Název	Střední rychlost hoření [kg. m⁻³. s⁻¹]
Dřevo (14 % vlhkost)	50
Přírodní kaučuk	30
Fenoplasty	10
Papír	30

Při požáru dochází k postupnému odhořívání povrchu rychlostí cca 0,7-1 cm. min⁻¹ (Žák and Reinprecht 1998).

1.3 Historie přípravků zvyšujících požární odolnost

Zvýšit požární odolnost dřeva za pomoci aplikace přípravků se lidé snažili již od dob antiky, a to za pomoci v té době dostupných materiálů a znalostí. Staří Egypťané chránili dřevo proti ohni tak, že je namáčeli ve vodním roztoku kamence. Ve starověkém Řecku jej zase namáčeli v roztocích soli, vodním skle či jej impregnovali vodnými roztoky (Krajčovičová *et al.* 2009).

V temné době středověku jako požární ochrana dřevěných krovů (chrámů, kostelů, hradů atd.) sloužily nátěry na způsob organických látek (impregnace dřeva volskou krví). Princip této ochrany spočíval v tom, že se během pyrolýzy u zmíněných nátěrů uvolňoval do vzduchu dusík. Z důvodu malé účinnosti ochrany, neměla tato požární opatření ve výstavbě větší vliv (Kafková 2017).

V průběhu dalších století se ochrana dřevěných konstrukcí stávala o něco vlivnější. V roce 1683 Sabbatini doporučoval ochraňovat dřevěné konstrukce hlínou a sádrou. Císař Josef II, který chtěl ve své době čelit častým a ničivým požárům nařídil, aby se dřevěné stropy s viditelnými prvky podbily rákosovými omítkami, čímž by se mělo zabránit prohoření mezi podlažími. V roce 1735 si J. Wild nechal patentovat ochranný prostředek proti ohni z kamence a boraxu. Gay Lucas si o pár desetiletí později (přesněji v roce 1781) nechal patentovat roztok anorganických solí, jakožto požární ochranu dřeva. Roku 1820 Fusch doporučil používat jako ochranu proti ohni vodní sklo (Osvald 2009).

Později v 19. století se začaly na ochranu používat amonné soli či kyseliny fosforečné, které mají uplatnění i v dnešní době (Movychem 2017, Potůček 2017).

Během 2. světové války se krovky povinně natíraly přípravkem na bázi obarveného vodního skla (narůžovělý tvrdý povlak), kterým se konstrukce chránila před degradací spojenou s nálety. Tento prostředek se objevoval na trhu s ochrannými prostředky pro dřevěné konstrukce až do 90. let minulého století pod obchodním názvem – Betogen D 55. Tyto protipožární nátěrové hmoty neměly z dnešního pohledu potřebnou kvalitu – zejména, co se přilnavosti k povrchu, praskavosti po vysušení a estetické stránky týče (Vinař 1999).

1.4 Přípravky na zvýšení požární odolnosti v současnosti.

V dnešní době jsou jako přípravky na zvýšení požární odolnosti dřeva a materiálů na jeho bázi používány intumescentní (zpeňovatelné) protipožární nátěry a zábranové nátěry. Těmito nátěry je možné za vhodných podmínek dosáhnout klasifikace konstrukce až do třídy A – nehořlavé (viz tab. 2. třídy hořlavosti). Zařazení ošetřené konstrukce do třídy hořlavosti A-nehořlavé znamená, podle platné normy to, že nátěr splnil příslušné srovnávací kritérium, které norma stanoví pro příslušný klasifikační stupeň. Nicméně to neznamená, že by dřevo bylo skutečně nehořlavé. Jedná se o požadavek v projektu, který musí ošetřená konstrukce splňovat (v dnešní době maximálně po dobu 15 minut), (ČSN EN 13501-1 2010).

Dnešní moderní technologie nám umožňují chránit dřevo proti působení ohně různými způsoby. Základní rozdělení přípravků na zvýšení požární odolnosti dřeva závisí na jednotlivých způsobech jeho ochrany – konstrukční, chemické a přírodní (Potůček 2015).

V současné době jsou jako požární ochrana voleny přípravky na bázi vanadu, složitých organických komplexů, modifikovaných polyuretanů a silikonu, některé intumescentní hmoty svým složením vycházejí z aplikací přírodního grafitu (Vašátko 2009).

1.4.1 Konstrukční ochrana dřeva proti ohni

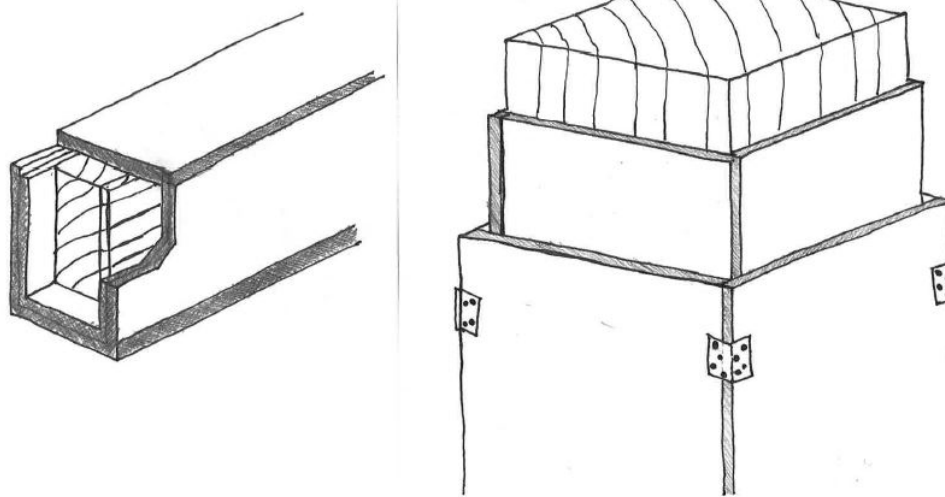
Konstrukční ochrana dřeva je popisována jako ochrana, která snižuje, popřípadě i úplně vylučuje, působení negativních vlivů biologických a nebiologických činitelů na dřevěné prvky pomocí vhodných konstrukčních a stavebně technických opatření (Solař 2014).

Konstrukční ochrana proti ohni se realizuje tak, že se prostor stavby rozdělí na požární úseky. Zajistí se, aby nedošlo k přímému styku částí dřevěné konstrukce s místy, kudy je vedeno vytápění, elektroinstalace, odtah spalin a s místy, kde jsou možné zdroje vysokých teplot, a tudíž potenciální riziko vzniku požáru (Kuklík 2005).

Používaná konstrukční ochrana dřeva proti ohni spočívá v přidání další konstrukce (obložení) či zasypání dřeva nehořlavými hmotami. Dřevo můžeme obalit

čedičovou nebo skelnou vatou. Konstrukční ochranou může být i omítnutí vápennou maltou. Tento způsob ochrany je poměrně účinný, ovšem jeho nevýhodou je ztráta estetičnosti dřeva, zvětšení rozměrů dřevěného prvku, a hlavně možnost odpadnutí od ochranné vrstvy podkladu. K odpadnutí může dojít mechanickým poškozením, stárnutím materiálu nebo až při vlastním požáru. U dřevěných nosných prvků můžeme však zlepšit jejich požární odolnost pouhým navržením většího průřezu (Potůček 2015).

Mezi další ukázky konstrukční ochrany dřeva a materiálů na jeho bázi, patří aplikace omítek a obklady (nejvíce jsou používány sádrokartonové a sádrovláknité desky) (Vašátko 2009).



Obr. 1. Příklad požárního obkladu sádrokartonovými deskami od firmy RIGIPS (Rigips, a.s., 2017)

1.4.2 Chemická ochrana dřeva proti ohni

Chemická ochrana dřeva a materiálů na jeho bázi je docílena chemickými prostředky, které snižují hořlavost dřeva nebo omezují šíření plamene po jeho povrchu (Kuklík 2005).

Dřevo a materiály na jeho bázi můžeme ochránit aplikací různých nátěrů či postřiků. Tyto nátěry nebo postřiky se označují jako retardéry hoření (Potůček 2017).

Chemické prostředky na ochranu dřeva rozdělujeme do dvou skupin:

-
- amonné soli – ty tvoří plynné zplodiny, které vytvářejí zábranu pro přístup vzduchu,
 - pěnotvorné (intumescentní) – vícesložkové systémy, které obsahují pojivo, nadouvadlo a retardéry hoření; při zvýšené teplotě vytvářejí vrstvu pěny, která plní funkci izolační.

1.4.3 Retardéry hoření

Retardéry hoření jsou ochrana, která má za úkol svými vlastnostmi (chemickým, fyzikálním nebo kombinovaným způsobem) chránit dřevo proti působení ohně a sálavého tepla. Současně tím oddálit zápalnost, snížit hořlavost a výraznou měrou zpomalit rychlost šíření plamenu po povrchu (Osvaldová 2005).

Zpomalovače hoření ovlivňují spalování dřeva tím, že zpomalují zápalnost a šíření plamene a snižují uvolňování tepla (Östman *et al.* 2001, Hagen *et al.* 2009). Protipožární prostředky pracují na různých principech, i když většina z nich používá několik mechanismů současně (Pries and Mai 2013).

Nejčastěji retardéry hoření vytvářejí nehořlavé dřevěné vrstvy na povrchu dřeva pod vlivem teploty a fyzicky brání přístupu kyslíku k dřevu. (Jiang *et al.* 2014, Merk *et al.* 2015). Požární retardéry pro dřevo používají chemikálie na bázi fosforu, dusíku, boru a kombinace těchto prvků (Wang *et al.* 2004, Gao *et al.* 2006, Marney *et al.* 2008). Protipožární prostředky se používají různými způsoby. Impregnace podtlakem je vysoce účinná, protože způsobuje zpomalení hoření do značné hloubky, ale je vhodná pouze pro konstrukční prvky, obklady a podlahové materiály před jejich použitím. Namáčení nevyžaduje komplikované stroje a je vhodné pro retardéry hoření, které jsou v roztoku, který může proniknout do dřeva. Povlaky, které jsou vhodné pro stávající konstrukce a zabudované prvky, používají po vysušení povlakové hmoty, které tvoří izolační vrstvu (Gašparík 2017).

1.4.4 Retardéry hoření v historii

Zpomalovače hoření dřeva byly známy již ve starověkém Řecku. V té době se dřevo namáčelo do vodných roztoků solí. Staří Egypťané chránili dřevo proti ohni jeho máčením ve vodných roztocích kamence. Ve středověku se dokonce dřevěné trámy natíraly volskou krví, která pyrolýzou uvolňuje nehořlavý plyn dusík. Dusík pak brání

přístupu kyslíku, čímž dochází ke snížení hořlavosti. V 19. století se na ochranu dřeva proti požáru začaly používat amonné soli kyseliny fosforečné. Po II. světové válce se za tímto účelem rozšířily roztoky na bázi obarveného vodního skla. Úroveň kvality těchto nátěrů byla orientována hlavně na reakci s ohněm. Široké uplatnění retardérů v praxi znemožňovaly některé vlastnosti, hlavně nedostatečná přilnavost k podkladu, praskavost po vysušení a neestetičnost (Potůček 2015).

Průlom ve výzkumu protipožárních nátěrových hmot by znamenal dosažení takových fyzikálně-mechanických vlastností, které by byly srovnatelné s dekorativními barvami, s přihlédnutím k ekologii a k ekonomice. Velmi důležitou vlastností je i přilnavost nátěru k podkladu. V praxi toto znamená dobrou odolnost nátěrů při vystavení povětrnostním vlivům (mráz, sníh, déšť). Při trvalém zatížení vodou by nemělo docházet k vymývání nátěru. Po vysušení by se měly původní vlastnosti nátěru vrátit (Movychem 2015; Vašátko 2009).

1.4.5 Rozdělení retardérů hoření

Retardéry hoření (do 70. let používaný výraz antipyrény) je v literatuře známý i pod názvem zpomalovače hoření v důsledku znemožnění přístupu vzdušného kyslíku. Jedná se o látky, které zpomalují, částečně, anebo úplně, zabraňují hoření. V rámci požární ochrany se k aplikaci retardérů hoření sahá velmi často. Nejběžnějším retardérem hoření je voda, ale v případě využití pro účely této práce je termínem retardér hoření, myšlen chemický zpomalovač (Bílková 2013).

Chemické látky, které se používají jako retardéry hoření dřeva, můžeme rozdělit podle toho, jak se chovají za zvýšené teploty dřeva nebo při samotném hoření dřeva. Retardéry tak mají při zvýšené teplotě nebo při hoření dřeva za úkol:

- vytvořit na povrchu dřeva tepelně izolující pěnu. Jedná se o takzvané zpěnitelné nátěrové hmoty neboli intumescentní (zpěňovatelné) protipožární nátěry, kterými lze za vhodných podmínek dosáhnout zatřídění konstrukcí až do třídy A. Funkce těchto nátěrů je dána rozkladem vhodně formulované chemické směsi, např. snadno karbonizujících látek solí kyseliny fosforečné a jiné. V současné době jsou již užívány i přípravky na bázi vanadu, složitých organických komplexů, modifikovaných polyuretanů a silikonu. Některé intumescentní hmoty

vycházejí z aplikací přírodního grafitu. Nátěr musí mít samozřejmě určitou vydatnost, obvykle 300 až 700 g/m² - v některých případech i více a musí být dobře zakotven do povrchu dřeva,

- zředit vznikající hořlavé plyny na takovou koncentraci, že se stanou nezápalnými a zabrání tak přístupu kyslíku ke dřevu při hoření. Takto můžeme dřevo chránit nátěry nebo impregnací. Pro tento účel jsou vhodné amonné soli nebo sloučeniny obsahující krystalickou vodu. Do doby než je spotřebováno teplo na jejich rozklad, brání tyto látky rovněž zahřátí dřeva na jeho rozkladnou teplotu,
- podpořit tvorbu zuhelnatělé izolační vrstvy a zamezit žhnutí vzniklého dřevěného uhlí. Jsou známy chemické sloučeniny, které působí na reakční mechanismus při rozkladu dřeva teplem tím, že podporují rychlost tvorby dřevěného uhlí. Jedná se především o látky, které mají buď kyselou reakci (obsahují volné anorganické kyseliny, kyselé soli), nebo volné anhydridy kyselin, které vznikají až při rozkladu těchto látek teplem. Do této skupiny látek patří především opět amonné sloučeniny (fosforečnany, halogenidy, síran), kyselina boritá a boritany. Dodatečnému žhnutí již zuhelnatělé vrstvy dřev zabraňují především fosforečnany, boritany, octany i halogenidy (Movychem 2015; Vašátko 2009).

V praktickém užití se ochranné účinky jednotlivých způsobů ochrany prolínají. Komerční ochranné prostředky mají obvykle mnohostranný účinek dosažený vhodnou kombinací více základních látek.

Společně s dalšími protipožárními prostředky, jako jsou např. sprinklery, detektory kouře, jsou retardéry hoření jeden z nejvíce efektivních prostředků pro ochranu lidí a jejich majetku před ničivými účinky požáru (Osvald *et al.* 2009).

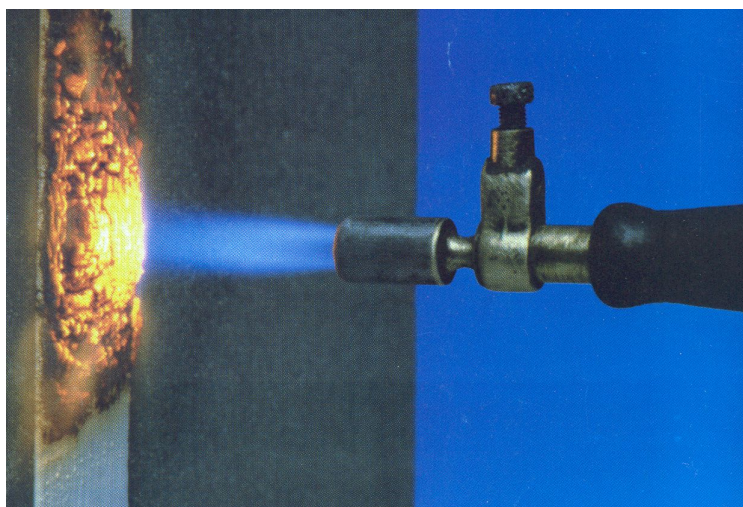
Retardéry hoření můžeme rozdělit do čtyř skupin:

- První skupina - tvoří ji zpomalovače, které uvolňují nehořlavé plyny v takovém tepelném rozsahu, kde se tvoří i hořlavé plyny, jako produkt degradace dřeva. Tím dojde ke zředění hořlavých plynů, sníží se jejich koncentrace a ztíží se jejich zapálení. Nejrozšířenějšími sloučeninami na ochranu dřeva před působením ohně jsou různé anorganické soli. Výhodou

těchto sloučenin je jejich rozpustnost ve vodě, a tudíž i variabilita impregnačních postupů (Osvald 1997).

- Druhá skupina - jedná se o retardéry hoření, které shromažďují teplo tepelného zdroje a tím jej ochlazují. Tyto látky nemají v současnosti větší aplikační použití, protože podléhají stárnutí a tím klesá jejich účinnost.
- Třetí skupina - v této skupině jsou retardéry, které mají intumescentní (pěnotvornou) funkci. Jejich účinnost je ze všech momentálně používaných a dostupných látek nejvyšší, a tím pádem mají i nejrozšířenější aplikaci (Janssens 1996).
- Čtvrtá skupina-retardéry mechanického typu. Jsou to například fólie a různé obklady z nehořlavých materiálů. Užití těchto retardérů na dřevo je sice účinné, ale nese s sebou řadu rizik, které je třeba podchytit.

V dnešní době se na retardéry kladou požadavky na komplexní ochranu proti degradaci požárem. To znamená nejen ochranu konstrukce před účinky požáru, ale např. i ochranu před toxicitou zplodin, které vznikají při požáru (Gray and Lee 1967).



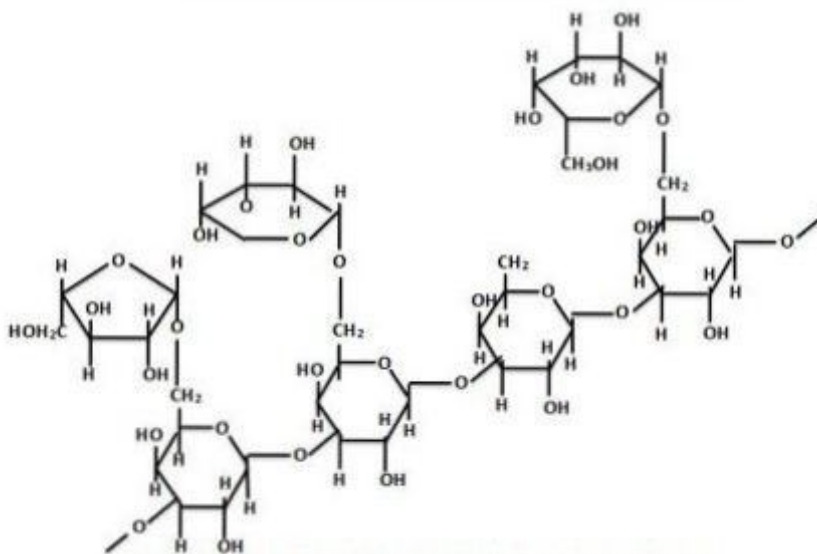
Obr. 2. Reakce retardéru při vystavení otevřenému plameni (intumescentní retardér) (Osvald *et al.* 2009)

1.4.6 Přírodní retardér hoření – Arabinogalaktan

Arabinogalaktán je biopolymer (vzorec $[(C_5H_8O_4)(C_6H_{10}O_5)_6]_x$) složený ze dvou monosacharidů arabinózy a galaktózy. V přírodě se vyskytují dvě třídy arabinogalaktánu – rostlinný arabinogalaktán a mikrobiální arabinogalaktán. V rostlinách je hlavní složkou mnoha gum, včetně arabské gummy a gummy ghatty. Často se

vyskytuje jako proteinech a výsledný protein arabinogalaktanu (AGP) funguje jako intercelulární signalizační molekula, jako lepidlo k utěsnění rostlinných ran (Nothnagel *et al.* 2000).

Arabinogalaktan je škrob (chemická látka), který se vyskytuje v mnoha rostlinách. Nejvyšší koncentrace tohoto škrobu byla zjištěna v buněčných stěnách (tracheidách) modřínu (až 30 %). Jeho největší využití je uplatněno v lékařství (Anonymus 2016).



Obr. 3. Chemický vzorec arabinogalaktanu (Arabinogalaktan 2017)

Získávání arabinogalaktanu je obtížné a jeho použití je finančně náročné. Nicméně je možné kyselinové arabinogalaktány získat jako odpad při rozvláknování smrkového a borovicového dřeva v papírenském průmyslu (Willfrö and Holmbom 1999).

Podle G.O. Aspinall, Arabinogalaktány můžeme rozdělit na dva typy

- **arabino-4-galactany** (type I)
- **arabino-3,6-galactany** (type II) (Aspinall *et al.* 1968).

V našem případě byl použit arabinogalaktán ze sibiřského smrku, který oproti arabinogalaktánu z modřínu obsahuje vyšší množství postranních řetězců kyselých jednotek (Willfrö *et al.* 1999).

Arabinogalaktán jsme smíchali v 50 % hmotnostní koncentraci vodního roztoku (50 g arabinogalaktánu a 50 g vody) a aplikovali štětcem v množství 500 g/m².

Arabinogalaktán ze smrku je suchý, sypký prášek s jemnou borovicovou vůní a sladkou chutí. Arabinogalaktánový prášek má vysokou čistotu 96-98 %. Smrkové jádro může obsahovat 35 % arabinogalaktánu. Sibiřský a dhurijský smrk, který roste na Sibiři, obsahuje 15 % arabinogalaktánu. Arabinogalaktán se extrahuje vodou ze smrkových částí, které nelze použít v dřevozpracujícím průmyslu. Proces extrakce na bázi vody je zcela bez rozpouštědel. To činí arabinogalaktán za produkt šetrný k životnímu prostředí. Arabinogalaktán může být používán v celé řadě oblastí, včetně medicíny, veterinární medicíny, farmaceutického, kosmetického a polygrafického průmyslu, a to i ve výrobě buničiny. Existuje mnoho synonym a zkratk arabinogalaktánu: AG; Ara-6; d-galakto-l-arabinan; Rozpustná vláknina; Galactoarabinan; MAS; Smrková guma; Larix, atd. (Kacík *et al.* 2013).

1.4.7 Syntetický retardér hoření – Flamgard Transparent

Protipožární nátěr Flamgard Transparent se skládá ze dvou složek:

- 1. složka je zpenitelná nátěrová hmota obsahující koksotvornou látku, dále pak látku, která je zdrojem minerální kyseliny (kys. fosforečná), napěňující látku, pojiva, plniva, aditiva a pomocné látky upravující užité vlastnosti přípravku,
- 2. složku tvoří krycí lak (LAK akrylátový S 1818).

Nátěrová hmota neobsahuje azbest, toxické pigmenty ani chlorované přísady.

Intumescentní protipožární nátěr na ochranu dřevěných konstrukcí v interiéru (s maximální relativní vlhkostí vzduchu 80%). Není vhodné jej použít na ošetření konstrukce krovu z důvodu působení slunečního záření a povětrnostních vlivů při, během a po aplikaci nátěru retardéru. Krycí lak, který je nedílnou složkou nátěru, nesmí být vystaven teplotě vyšší než 50 °C. Tím pádem není vhodné přípravek aplikovat do prostředí, kde je počítáno s výskytem stále vyšší teploty (může dojít k nežádoucímu počátečním projevům napěnění, lepení). Dále by se přípravek neměl použít na již ošetřené dřevo jiným přípravkem. Přípravek působením ohně nebo sálavého tepla vytváří na povrchu silnou, nehořlavou, tepelně izolující vrstvu, která způsobí určitou časovou prodlevu spolehlivě chránící materiál. Flamgard se nanáší v neředěném stavu

na očištěné dřevo štětcem nebo válečkem. Při aplikaci musí být dodržen aplikační návod. Pro účinnost přípravku je nutný min. nános 500 g/m². Flamgard Transparent je šedobílá suspenze na bázi amonných fosfátů s přísadami zpěňujícími, retardéry hoření a polymerů. Přípravek lze barevně tónovat. Životnost nátěru je dle akreditovaných zkoušek minimálně 15 let. Přípravek se nanáší min. ve 3 a více vrstvách nátěrem neředěného přípravku tak, aby byla dodržena předepsaná spotřeba 500 g/m². Jednotlivé vrstvy se nanášejí postupně po proschnutí předchozí vrstvy minimálně po 12 hodinách při 20 °C v suchém prostředí (do max. relativní vlhkosti vzduchu 80 %). Poslední vrstvu je třeba nechat zaschnout minimálně 24 hodin (Kozínová 2017).

Nátěr retardéru je po zaschnutí průhledný se světle žlutým odstínem a zachovává původní kresbu dřeva. V procesu hoření vytváří protipožární nátěrová hmota svým tepelným rozkladem na povrchu chráněného materiálu silnou nehořlavou, tepelně izolující pěnovou vrstvu, která způsobí určitou časovou prodlevu spolehlivě chrání materiál proti působení ohně a sálavého tepla (Stachema 2017).

1.4.8 Použití retardérů hoření na rostlé dřevo

Způsoby aplikace určuje samostatný druh zvoleného zpomalovače (např. pěnnotvorný retardér lze aplikovat pouze nátěrem na povrch). Jiné retardéry (1. skupina), které jsou na bázi vodorozpustných roztoků anorganických solí, je možné aplikovat nátěrem, máčením či impregnací.

Význam aplikace retardéru je viditelný na ovlivnění hodnoty Q (uvolněné teplo z degradovaného materiálu) (Makovický and Osvaldová 2004).

Ve většině případů užití ochranných látek při stavbě dřevostaveb se setkáme s aplikací dvou složek impregnace – fugicidně-insegnicidními látkami a pak zvoleným zpomalovačem hoření (Osvald 2009).

1.4.9 Použití retardérů hoření na termicky upravené dřevo (thermowood)

V rámci D třídy hořlavosti dřeva má thermowood horší požární vlastnosti než rostlé dřevo. Proto je nutné při chemické ochraně dřeva provádět nátěry s větší pečlivostí nebo provádět nánosy ve větších vrstvách. Ale ani s využitím nejmodernějších retardérů nejsme schopni zvýšit požární odolnost dřeva o více než 15

minut. Za maximální zlepšení požární odolnosti můžeme považovat to, když dřevo splňuje podmínky pro zařazení do třídy A požární odolnosti.

Termicky upravené dřevo je zařazeno stejně jako rostlé do skupiny materiálů se stupněm hořlavosti D. Na požární ochranu thermowoodu jsou tak použity stejné retardéry hoření, jako pro aplikaci na rostlé dřevo (Potůček 2015).

2 Dřevo

Dřevo ponejprv sloužilo jako palivo, a tedy prostředek k udržení ohně a k přežití. (Dejmal 2009). Následně tuto velice oblíbenou surovinu využívali převážně pro stavební a nábytkářské účely. Výhodou, proč se dřevo stalo a stále je tolik oblíbeným materiálem, je jeho vysoká pevnost v poměru k jeho objemové hmotnosti, ekologický a pocitově příjemný vzhled a relativně snadná opracovatelnost v porovnání s jinými užívanými materiály.

Zatímco v nábytkářství dřevo naplno využilo svůj potenciál, ve stavebnictví na své celoplošné používání stále ještě čeká. To je ovlivněno tím, že dřevo má na rozdíl od jiných užívaných materiálů, odlišné vlastnosti (hygroskopicitu, nehomogenitu, anizotropie) (Böhm *et al.* 2012).

Z důvodu odbourání některých negativních vlastností dřeva vznikla potřeba výroby nových materiálů na bázi dřeva (překližky, aglomerované materiály, - atd.) (Kačíková *et al.* 2006).

Dřevo, jako surovina pro zpracování a využití, je surovinou obnovitelnou, takže s hospodárnou těžbou lze dřevo považovat za nevyčerpatelný zdroj (Dejmal 2009).

Nejpočetnějším zástupcem jehličnanů, co se plošné míry týče, je ve střední a východní Evropě smrk (*Picea abies* L.).

2.1 Dřevo smrk (*Picea abies* L.) - obecná charakteristika

Dřevo, smrku se řadí mezi měkká a lehká dřeva, dobře se suší, opracovává, ale je méně trvanlivé. Tento druh dřeva se u nás zařazuje k nejdůležitějším průmyslově zpracovávaným a užitkovým dřevinám. Jedná se o univerzální dřevo, jeho výhodou je rozmanitost produktového využití. Ze smrkového dřeva se získává hlavně řezivo, papír a palivo, uplatňuje se ale také hojně v truhlářské výrobě a stavebnictví (Vondrová 2017).

Dřevo smrku je žlutobílé, nahnědlé a lesklé, jeho letokruhy jsou dobře znatelné s pozvolným přechodem mezi jarním a letním dřevem. Smrkové dřevo patří k měkkým a lehkým dřevům. Je méně trvanlivé a odolné proti hmyzu a houbám.

Použití smrkového dřeva je mnohostranné. Používá se jako stavební a konstrukční materiál, dále pak v nábytkářství a na chemické a polo chemické

zpracování. Přestože se hustota jarního a letního dřeva značně liší, uplatňuje se často i v řezbářství (Celý 2009).



Obr. 4. Radiální řez – smrk obecný (Jehličnaté dřeviny, 2014)

Letokruhy jsou na příčném řezu dobře viditelné. Zřetelné jsou pryskyřičné kanálky, a to zejména na podélných řezech dřeva (Walker 2009).

Smrkové dřevo se nejčastěji používá na dřevěné konstrukce. Je bílé až nažloutlé barvy, mírně smolnaté, s pevně zarostlými suky. Je měkké, lehké, pružné, dobře štípatelné a je vhodné k lepení. V neposlední řadě se lehce a dobře zpracovává. V suchém prostředí je to trvanlivé dřevo, a naopak ve vlhkém prostředí je velice náchylné k hnilobě (Kuklík 2005).

Smrk je charakteristický svými vlastnostmi, těmi jsou např. přirozená kresba, barva a, fyzikální a mechanické vlastnosti. Nejběžněji využívanou částí stromu je dřevo kmene, které může zaujímat až 90 % objemu stromu. Dřevo smrku je materiál, který se snadno pracovává, nechá se spojovat různými způsoby, dobře se suší, ale obtížněji impregnuje. Vzhledem ke své hmotnosti je dřevo výjimečné v oblasti pevnosti a pružnosti, což se dá využít v širokém rozsahu potřeb člověka. Jeho slabinou je schopnost přijímat vlhkost, vodu a fotodegradace. Kombinací těchto vlastností dřeva dochází někdy ke snadnému napadení biotickými činiteli (Šlezingerová *et al* 2009).

Smrkové dřevo má po vysušení průměrnou hustotu 430–460 kg/m³ (Matovič 1992). Schne rychle a dobře, s malým rizikem deformací. Má nízkou tuhost a rázovou houževnatost, střední pevnost v ohybu a tlaku a velmi malé předpoklady pro ohýbání. Při použití vykazuje minimální tvarové změny.

2.1.1 Makroskopická stavba smrkového dřeva (*Picea abies* L.)

Makroskopickou stavbu smrku je možno pozorovat okem nebo lupou. Znaky, které lze takto pozorovat, jsou například: letokruhy, suky, běl, dřeň, pryskyřičné kanálky, vyzrálé dřevo a cévy. Tyto znaky jsou jednou ze základních pomůcek při určování druhů dřev a kvality dřev u dřevin. Letokruhy jsou tvořeny činností kambia během vegetačního období a jsou přerušeny v období vegetačního klidu. Letokruh je složen ze dvou vrstev – jarního a letního dřeva. Ostrost přechodu jarního a letního dřeva je pozvolná. Jarní dřevo má obvykle silnější vrstvu a světlejší barvu, je to přírůstek na začátku vegetačního období. Letní dřevo je tmavší, slabší, ale pevnější a tvoří se na konci vegetačního období.

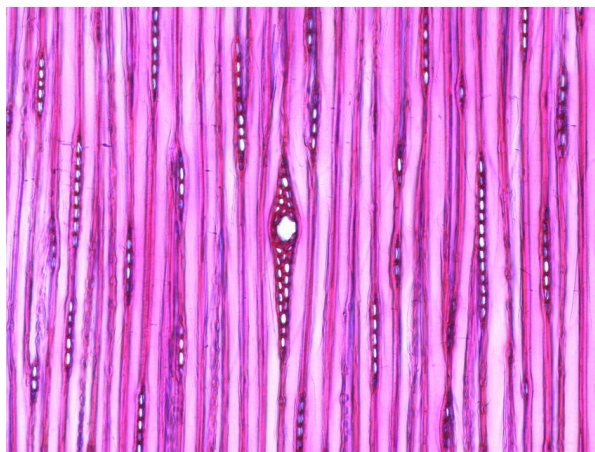
Barva dřeva je světlá žlutohnědá. Smrk se řadí mezi dřeva bělová s vyzrálým dřevem. Vyzrálé dřevo se dá považovat za mrtvé bez vodivé funkce.

Pryskyřičné kanálky jsou rysem jehličnatých dřevin. Orientovány jsou horizontálně i vertikálně a jsou vzájemně propojeny. U smrku jsou zastoupeny 0,2 % v celkovém objemu dřeva. Jejich funkcí je shlukovat a vylučovat pryskyřici.

Suky jsou části větví s hustě rostlými letokruhy, vyznačující se tmavou barvou. Jsou považovány za vady, které ovlivňují mechanické vlastnosti dřeva (Tulach 2009).

2.1.2 Mikroskopická stavba smrkového dřeva (*Picea abies* L.)

Mikroskopická stavba smrku se vyznačuje jednodušší anatomickou stavbou. Přebývá zde výskyt tracheidů – cévic, které tvoří 90–94 % celkového objemu dřeva. Ty mají rozdílnou funkci i stavbu v jarním a letním dřevě. Zbývající objem dřeva tvoří parenchymatické buňky. Jarní tracheidy plní vodivou funkci a letní tracheidy plní mechanickou (vytuzovací) funkci. Délka tracheidů se pohybuje v rozmezí od 2 do 6 mm. Parenchymatické buňky zastávají funkci rozvedení organické vyživovací látky. Pryskyřice v kanálcích plní během dorůstání ochrannou funkci a působí jako impregnace (zvyšuje odolnost dřeva proti nákaze v podobě např. hnilobných hub) (Požgaj *et al.* 1997).



Obr. 5. Mikroskopické zobrazení pryskyřičných kanálků u smrkového dřeva (tangenciální řez-zvětšeno 100x) (Zeidler and Böhm 2007)

2.1.3 Chemické složení dřeva

Dřevo je komplex různých látek, z nichž základ tvoří přírodní polymery celulóza, hemicelulóza a lignin (Gandelová *et al.* 2009).

Tyto tři složky jsou označovány za hlavní složky dřeva. Celulóza je polysacharid ve vodě nerozpustný, jehož D-glukozové podjednotky jsou spojeny vazbou β (1-4). Procentuální zastoupení celulózy je v průměru 35-55 %. Část celulózy uspořádaná do pravidelného tvaru pomocí vodíkových vazeb se nazývá krystalická. Zbylá část, tzv. amorfní, není tak pevná jako část krystalická. Rozpustná je celulóza pouze v silných anorganických kyselinách. Celulóza nachází využití při výrobě buničiny a papíru, dalšími procesy a úpravami se buničina využívá k výrobě plastů, folií, laků, lepidel. Hemicelulózy jsou spojícím prvkem celulózy a ligninu. Jejich vlastnosti se odvíjí od délky základního řetězce, rozvětvení a acetylace. Zastoupení se liší i u druhu dřevin. Jehličnany obsahují 20–35 % a listnaté dřeviny 23–30 % objemu dřeva (Tulach 2009).

Chemické složení dřeva má vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.

2.1.4 Fyzikální vlastnosti smrkového dřeva

Fyzikální vlastnosti dřeva zahrnují děje, které nastávají při přijímání a odevzdávání vody. Ve dřevě se nachází voda vázaná, která je obsažena ve stěnách

buněk a voda volná, která je obsažena mimo stěny buněk. Vlivem procentuálních změn vody vázané se mění tvar dřeva – dochází k sesychání a bobtnání dřeva (Tulach 2009).

Dřevo smrku lze z hlediska trvanlivosti (na vzduchu) zařadit mezi středně trvanlivé dřeviny. Při kontaktu se zemí a zemní vlhkostí, kde je větší pravděpodobnost degradace hnilobou, je smrkové dřevo považováno za málo trvanlivé (Požgaj *et al.* 1997).

Zařazení materiálu mezi hořlavé látky závisí na řadě kritérií, která jsou zkoušena podle odpovídajících norem. Hořlavost dřeva je určována pomocí třech bodů, kterými jsou bod vzplanutí, bod hoření, bod zápalnosti a samotný termický rozklad dřeva. Jednotlivé body se udávají vždy v určitém teplotním rozpětí, a to v závislosti na druhu dřeva, jeho hustotě, chemickém složení a vlhkosti (Zejsa *et al.* 2007).

2.1.5 Mechanické vlastnosti smrkového dřeva

Mechanickými vlastnostmi dřeva se rozumí vlastnosti dřeva z hlediska pevnosti a pružnosti. Mechanické vlastnosti dřeva závisí na charakteru zatížení (statické, dynamické, rázové) a na trvání zatížení (stálé, dlouhodobé, střednědobé, krátkodobé, okamžikové (Kuklík 2005).

Vliv anizotropie se projevuje i na mechanických vlastnostech dřeva (Požgaj *et al.* 1997).

Mechanickými vlastnostmi dřeva se rozumí jeho schopnost odolávat účinku vnějších sil. Dělí se do tří skupin:

- základní (pevnost, pružnost, plastičnost, houževnatost),
- odvozené (tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení),
- technologické (štípatelnost, opotřebovatelnost, ohýbatelnost).

Působení mechanických sil na dřevo nazýváme mechanické namáhání. Při mechanickém namáhání se dřevo chová odlišně vzhledem k anatomické stavbě, chemickému složení a geometrii tělesa (Tulach 2009).

Tab. 6. Základní mechanické vlastnosti smrkového dřeva při vlhkosti 12 % a vlhkosti větší než 30% (Požgaj *et al.* 1997)

Vlastnost	Rovnoběžně s vlákny		Kolmo na vlákna	
	w = 12 %	w > 30 %	w = 12 %	w > 30 %
Pevnost v tahu (MPa)	90		2,7	
Pevnost v tlaku (MPa)	50	19	4	2
Pevnost ve smyku (MPa)	6,7	4,3		
Pevnost v ohybu (MPa)	78	44		
Modul pružnosti v tahu (MPa)	14960		550	
Modul pružnosti v tlaku (MPa)	13650		290	
Modul pružnosti ve smyku (MPa)	573			
Modul pružnosti v ohybu (MPa)	11000	8600		
Houževnatost (J/ cm ²)			4,6	
Tvrдость podle Brinella (MPa)	32		12	
Tvrдость podle Janka (MPa)	26		18	

Mechanické vlastnosti smrkového dřeva se liší podle směru zatížení a struktury složení dřeva, která je závislá na absenci, nebo přítomnosti jarního či letního dřeva. Smrkové dřevo jako takové lze popsat obecně jako ortotropní materiál (tedy rozdílné mechanické vlastnosti ve třech směrech – podélném, tangenciálním a radiálním) (Karinkanta 2015).

3 Modifikace dřeva

Pojmem modifikace dřeva, rozumíme dřevo s vylepšenými (modifikovanými) vlastnostmi. Dřevo, obdobně jako každý přírodní materiál, má své přednosti (trvale obnovitelná surovina s nízkou zátěží životního prostředí, vysoký poměr pevnosti vůči hustotě a nízká tepelná vodivost), výhody (dá se dobře opracovávat a příjemně působí na člověka) i nevýhody (náchylnost na poškození jednak abiotickými činiteli – oheň, slunce, voda, změna teploty, mechanické vlivy, tvarová deformace, hořlavost a druhak biologickými škůdci – dřevokazný hmyz a houby) (Reinprecht 2012).

Modifikované dřevo je dřevo se záměrně změněnou strukturou a s cíleně zlepšenými vlastnostmi, jako je biologická odolnost, termická odolnost, odolnost vůči agresivním chemikáliím, odpudivost vůči vodě, hydrofobnost, rozměrová stabilita, barevná stabilita, pevnost, tvrdost apod. Modifikace dřeva je jedním ze způsobů ochrany dřeva. Správnou ochranou dřeva dosáhneme prodloužení životnosti výrobků ze dřeva (Reinprecht 2012).

Technologie modifikační ochrany dřeva (stejně tak jako fyzikální, konstrukční i chemické ochrany) významně záleží na struktuře dřeva. Struktura dřeva rozhodujícím způsobem ovlivňuje jeho přirozenou trvanlivost – odolnost vůči abiotickému i biologickému poškození (Reinprecht 2012).

3.1 Způsoby modifikace dřeva

Hlavní úlohou modifikačních metod je záměrná změna struktury, která vede k cíleně vylepšeným vlastnostem, kterými jsou biologická odolnost, termická odolnost, rozměrová stabilita, odolnost vůči agresivním chemikáliím, odpudivost vůči vodě, barevná stálost, pevnost, tvrdost apod. Způsoby, kterými se mění základní vlastnosti materiálu, se označují pojmem modifikace, ty je možné rozdělit na několik druhů, a to na mechanickou, chemickou, biologickou a termickou. Těmito změnami se prodlužuje životnost výrobků ze dřeva (Vondrová 2017).

V současné době rozeznáváme již několik způsobů modifikace dřeva:

- mechanická metoda modifikace (lisování, ohýbání),
- chemická metoda modifikace (modifikace acetylací, modifikace furfurylací, modifikace DMDHEU, modifikace silikony, modifikace čpavkem),

-
- mikrovlnná metoda modifikace,
 - termická metoda modifikace,
 - příprava v prostředí vodní páry (PlatoWood)
 - příprava v olejích (OHT-Wood, RoyalWood)
 - příprava v prostředí inertních plynů (RetificatedWood)
 - příprava za použití teplé páry a oleje (WTT)
 - příprava v atmosféře vzduchu (ThermoWood) (Reinprecht and Vidholdová 2008).

3.2 Termická modifikace dřeva

Jednou z nejvíce perspektivně rozšiřujících se způsobů modifikace je termická úprava, která je považována za typ modifikace šetrný k životnímu prostředí. V zásadě platí, že hlavní úlohou této přeměny dřeva je zvýšit odolnost méně trvanlivých druhů vůči různým abiotickým a biologickým činitelům (Hill 2006).

Termickou modifikací dřeva se upravují vlastnosti dřeva působením vysokých teplot. Naši předkové si byli této skutečnosti vědomi, a proto opalovali povrch dřeva v otevřeném ohni, kdy materiálu prodloužili životnost a dřevo se tak stalo odolnějším. Opalovali například konce plotových stojek a tím zvýšili jejich trvanlivost (Esteves *et al.* 2008).

Na vědecké úrovni se tepelné zpracování dřeva začalo zkoumat v průběhu třicátých let 20. století, kdy probíhalo v Německu, avšak jeho náročnost neumožňovala bezproblémové technologické zvládnutí. Tyto problémy se vyřešily až s příchodem moderních technologií v 90. letech 20. století, kdy se ve Finsku se začalo produkovat modifikované dřevo s patentovaným názvem ThermoWood. Primárním cílem průmyslové tepelné modifikace je přeměna domácích snadno dostupných dřevin na produkt, který se bude vlastnostmi podobat dřevinám tropickým (ThermoWood Handbook 2003; Reinprecht 2008).

V současnosti se na evropském trhu vyskytuje několik různých výrobců tepelně modifikovaného dřeva:

- Finsko - příprava v atmosféře vzduchu (ThermoWood).

-
- Holandsko - příprava v prostředí vodní páry (PlatoWood).
 - Francie - příprava v prostředí inertních plynů (Bois Perdure a RetificatedWood).
 - Německo - příprava v olejích (OHT-Wood, RoyalWood).

Nové způsoby se v současnosti rozvíjí v Dánsku pod názvem WTT a v Rakousku pod značkou Huber Holz, oba způsoby využívají při výrobě horkou páru, ale WTT do procesu přidává ještě olej (Navi and Sandberg 2012; Militz and Tjeerdsma 2002; Reinprecht and Vidholdová 2008).

Každý výrobce má odlišnou technologii výroby, která se liší hlavně ve složení plynné atmosféry ohřívající dřevo. Dále také ve vlhkosti nebo použití oleje, jenž je využíván jako médium přenášející teplo. Modifikace se vždy provádějí ve 160 °C–260 °C rozmezí teplot (Militz and Tjeerdsma 2002; Reinprecht and Vidholdová 2008).

Termicky modifikovat lze všechny druhy dřev, ale na výrobu termodřeva se v praxi spíše používají netrvanlivé a méně trvanlivé druhy dřeva - např. smrk, borovice, buk, bříza, osika a jasan (Reinprecht 2012).

Chemické složení dřeva (celulóza, hemicelulóza a lignin) předpokládá malou odolnost dřeva vůči působení enzymů dřevokazných hub a hmyzu. Zároveň je dřevo materiál hygroskopický s tendencí přijímat vlhkost. Zvyšováním teploty dřeva přibližně od 180 °C do 260 °C v bezkyslíkaté atmosféře dochází k jeho postupné hydrolýze (Dejmal 2009).

Pokud má dřevo teplotu nižší než 140 °C, je vliv na užité vlastnosti nízký. Při teplotách nad 300 °C dřevo degraduje a užité vlastnosti ztrácí (Hill 2006).

Z důvodu předejití rizika vznícení dřeva, je třeba tepelnou úpravu dřeva provádět buď ve vakuu, v dusíku nebo v páře či oleji. Důsledkem termické modifikace dřeva je řada pozitiv (nižší rovnovážná vlhkost, snížení hmotnosti – hustoty, snížení deformace, lepší rozměrová stabilita – redukované sesychání a bobtnání, vyšší odolnost proti plísním, hnilobám a dřevokaznému hmyzu a též vysoká životnost). Tepelná úprava dřeva má i své nevýhody. Sníží se pevnost dřeva (zejména v ohybu), ze struktury vypadávají suky, vypaří se pryskyřice a dřevo změní svou barvu (po úpravě má tmavší odstín), (Dejmal 2009).

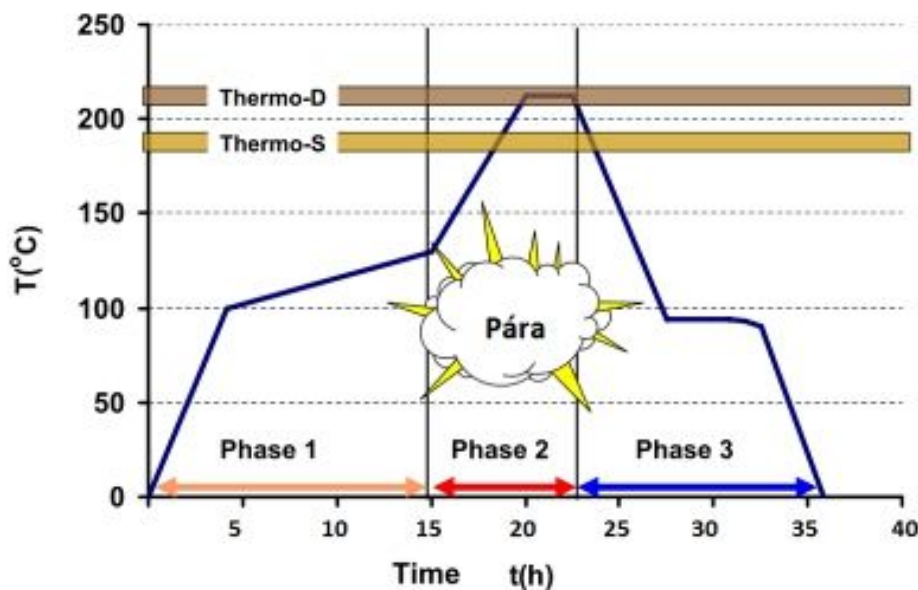


**Obr. 6. Thermowood – fasádní a terasový profil (DŘEVĚNÁ FASÁDA
A TERASY Z MASIVU -ThermoWood, 2015)**

3.2.1 Výrobní proces ThermoWoodu

Tepelné zpracování probíhá v teplotním rozsahu 160–240 ° C. Během výroby ThermoWood se mění vnitřní uspořádání a související fyzikální vlastnosti dřeva. Různé druhy ošetření dřeva jsou vhodné pro různé použití a konkrétní použití závisí také na výsledné barvě. Čím je teplota při zpracování vyšší, tím je tmavší odstín zpracovávaného dřeva. Tepelné zpracování dřeva nezatíží životní prostředí, protože tento proces vyžaduje pouze vodní páru a teplo (PROKOM 2013).

Proces výroby termicky modifikovaného dřeva je v literatuře a na stránkách výrobců uváděn jako třífázový (obr. 7.).



**Obr. 7. Postup výroby termicky upraveného dřeva (ThermoWood)
(dřevěné fasády a terasy z masivu-ThermoWood 2015)**

4.2.1.1 Zvyšování teploty a zvlhčování

Teplota se v komoře rychle zvýší na 100 ° C za přispění působení vodní páry. Potom pomalu stoupá na 130 ° C. Jako sušící médium se používá horký vzduch nebo horká pára. Během této fáze se dřevo suší na přibližně nulovou vlhkost.

Tato fáze je nejvíce časově náročná. Relativní vlhkost dřeva je snížena na téměř nulovou vlhkost. Celková doba této fáze závisí na relativní vlhkosti vstupního materiálu, který tepelně modulujeme (PROKOM 2013).

4.2.1.2 Tepelné zpracování

Ve druhé etapě se teplota zvýší na 180 až 215 ° C nebo na 240 ° C po dobu dvou až tří hodin. Teplota a doba působení na dřevo jsou dané požadavky na klasifikační třídu materiálu.

Během této fáze probíhá samostatná úprava materiálu. V závislosti na požadované úrovni úpravy se teplota v komoře zvýší na konečnou teplotu (např. 240 ° C). Následně se tato teplota udržuje v průběhu celého procesu, dvě až tři hodiny, v závislosti na konkrétních nastaveních procesu (PROKOM 2013).

4.2.1.3 Nastavení chlazení a vlhkosti

V posledním kroku se tepelně zpracované dřevo postupně ochlazuje a při teplotě 80 až 90 ° C se stabilizuje.

V tomto stádiu se dřevo postupně ochladí na teplotu srovnatelnou s teplotou okolí. Pokud by teplota výstupu materiálu byla výrazně vyšší než teplota okolí, mohla by se poškodit surovina. Spolu se sníženou teplotou se provádí zvlhčování tak, aby byl materiál navlhčen na vlhkost vhodnou pro jeho následné zpracování, Asi 10–12 % relativní vlhkosti. V závislosti na konkrétním stupni tepelného zpracování materiálu je tato třetí fáze dlouhá, zpravidla trvá 5 až 15 hodin (PROKOM 2013).

Při výrobě ThermoWood se toxické chemikálie nepoužívají, ale pouze teplo (nebo vodní pára), které je šetrné k životnímu prostředí, pokud jde o výrobu a následnou aplikaci tohoto dřevěného materiálu. ThermoWood se vyznačuje zvýšenou trvanlivostí vnitřních a vnějších expozic ve srovnání s neošetřeným dřevem. Dnes se doporučuje pro vnitřní prostory – dlaždice, podlahy, kuchyňský nábytek, sauny apod., ale také pro některé venkovní prostory. Je zvláště vhodný pro třídu odolnosti bez kontaktu s terénem – vnější fasády, oplocení nad terénem, zahradní nábytek izolovaný od země s plastovými podložkami apod., až do čtvrté třídy odolnosti – terasy, dětské hřiště, protihlukové stěny, výztuž vodních kanálů atd (Reinprecht and Vidholdová 2008).

3.3 Charakteristika termicky (tepelně) upraveného dřeva

Hlavním cílem termické modifikace dřeva je vytvoření materiálu, který bude:

- podstatně více odolný vůči vodě a biologickým činitelům,
- rozměrově a tvarově stabilní, což je dosaženo snížením navlhavosti dřeva (absorpce vlhkosti se sníží o 30-90%),
- mít variabilní použití v místech s opakovaným kontaktem s vlhkostí (procesu snížení vodopropustnosti),
- mít vylepšené tepelně izolační vlastnosti a zároveň sníženou tepelnou vodivost,
- bez obsahu pryskyřice,
- vykazovat zachování nebo zlepšení estetických vlastností dřeva (lesk, textura, barva a minimální podíl trhlín),

-
- mít výrazně prodlouženou životnost (výrobce udává 30 let bez následné impregnace),
 - vhodný jako alternativa trvanlivých a tvarově stabilních exotických druhů dřeva,
 - použitelný pro náročné podmínky exteriéru a interiéru.

Zlepšené vlastnosti, které získáme tímto procesem, má sortiment v celém svém průřezu. Tyto vlastnosti u termicky upraveného dřeva přetrvávají po celou dobu jeho životnosti. Většina technologických procesů výroby thermowoodu přispívá k úbytku rázové houževnatosti, dřevo je křehčí, má zvýšenou štípatelnost a nižší pevnost v ohybu a tahu. Tím pádem by se nemělo využívat v nosných konstrukcích (Reinprecht and Vidholdová 2008).

3.3.1 Fyzikální vlastnosti termicky (tepelně) modifikovaného dřeva

Procesem tepelné modifikace se na ThermoWoodu projevují změny vlastností (rozměrová stabilita, hygroskopicitá, hustota, barva a vůně, částečně tepelně izolační a akustické vlastnosti) (Potůček 2015).

- Rozměrová stabilita

Rozměrová stabilita je úzce spjata s vlhkostí obsaženou ve dřevu, která má vliv na jeho tvar (bobtnání a sesychání). Změny tvaru vlivem bobtnání a sesychání můžeme na dřevě pozorovat pouze v intervalu od absolutně suchého dřeva do bodu nasycení vláken (tedy 30 % vlhkosti).

Termicky upravené dřevo je v porovnání s rostlým dřevem tvarově stabilnější díky vlivu působení tepla a s tím spojených chemických změn, kdy část odbouraných OH skupin zamezuje vázání většího množství vody do buněčných stěn. Tím pádem je zajištěna větší tvarová (rozměrová) stabilita (ThermoWood Handbook 2013).

Dřevo si zachovává tvar již při svém sušení při teplotách okolo 110 °C (Potůček 2015).

- Hygroskopicita

Je to schopnost dřeva přijímat vodu z okolního vzduchu a odevzdávat ji zpět. Ve dřevě se nachází jak voda volná, tak voda vázaná, přičemž vlastnosti dřeva významně ovlivňuje voda vázaná.

Za poklesem hygroskopicity při působení vyšších teplot stojí především odbourání určitého podílu hemicelulóz, dále také odbourání či prostorová blokáce hydrofilních – OH funkčních skupin. V neposlední řadě též migrace a redistribuce lipidních a jiných hydrofobních látek.

U thermowoodu je snížena hodnota bodu nasycení vláken o 30 až 70 %. U termicky upraveného dřeva jsou oproti rostlému dřevu plošší sorpčně-desorpční hysterezní křivky než u rostlého dřeva. Při klimatických podmínkách o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti v rozmezí 60 až 65 % se potvrdilo snížení vlhkosti dřeva tepelně upraveného v porovnání s rostlým dřevem až třikrát (Reinprecht and Vidholdová 2011).

- Hustota

Jedním ze základních parametrů dřeviny je její hustota. Díky hustotě jsme schopni odvodit další vlastnosti dřeviny.

Na hustotu mají vliv především chemické složení, stavba a vlhkost dřeva; dále pak poloha ve kmeni, pěstební opatření a stanovištní podmínky (poloha vůči světovým stranám a slunci). Hustota se počítá na základě měření objemu a hmotnosti vzorku při nulové vlhkosti (Horáček 2009).

Termicky upravené dřevo má prokazatelně nižší objemovou hmotnost než rostlé dřevo. Při termické úpravě dochází k vysušování dřeva, k odbourávání hemicelulóz a některých průvodních látek, čímž dřevo ztrácí svou hmotnost. Nejvíce úbytek hmotnosti při procesu vysušování ovlivňuje druh dřeviny (u listnatých dřevin je úbytek hmotnosti větší než u jehličnanů). Objem dřeva se při vysušování též zmenšuje, avšak rozdíl není tak markantní jako je tomu hustoty. Velikost ztráty závisí také na teplotě a na době působení teploty. Při porovnání výsledků a při teoretických výpočtech používáme hustotu v absolutně suchém stavu ρ_0 . Absolutně suchým stavem rozumíme 0 % vlhkost dřeva (Thermowood Handbook 2003).

- Barva a vůně

Barva dřeva je jedním ze základních znaků při určování dřeviny. Barvu určují jeho stavební části, především pak celulózy, hemicelulózy, lignin a další doprovodné látky. Dřevo se díky působení vysokých teplot zbarvuje do žlutohnědých a postupně až do hnědočerných odstínů. Tyto změny jsou pro termicky modifikované dřevo charakteristické. Se zvyšující se teplotou a s jejím delším časovým působením se dřevo vybarvuje do stále tmavších odstínů hnědočerné. Barva dřeva se mění již při působení teploty okolo 100 °C. Díky tomu má termicky upravené dřevo svou charakteristickou barvu – často je tato barva podobná exotickým dřevinám, např. merbau nebo teaku (Potůček 2015).

Důležitou vlastností termicky upraveného dřeva je i stálost barvy. Termicky upravené dřevo při vystavení povětrnostním podmínkám a UV záření sice postupnému blednutí barvy podléhá, ovšem tato změna není tak výrazná jako u dřeva rostlého.

Termicky modifikované dřevo je dále charakteristické svou vůní, která může připomínat vůni karamelu. Se vzrůstajícím podílem prchavých látek se výraznost vůně zvětšuje; je však zcela zdravotně nezávadná. Přesto termicky modifikované dřevo nebývá doporučováno k použití v interiéru (Reinprecht and Vidholdová 2011).

- Tepelně-izolační a akustické vlastnosti

Termická modifikace dřeva snižuje jeho tepelnou vodivost o 10–30 %. Z toho důvodu je výhodné používat Thermowood na vnější obklady budov, dveře, okna a sauny.

Při mírnějších teplotách lze připravit i termicky upravené dřevo s velmi dobrými akustickými vlastnostmi, které se podobají dřevu vzácných historických hudebních nástrojů. Tohoto lze dobře využít při restaurování. Díky dobré rozměrové stabilitě je termicky upravené dřevo vhodné i na nástroje používané v extrémně měnících se klimatických podmínkách (Potůček 2015).

3.3.2 Mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Díky termické modifikaci dochází u dřeva ke zhoršení všech jeho mechanických vlastností. To je jedním z důvodů, proč není tepelně upravené dřevo využíváno pro nosné konstrukce. Nejvíce je tepelnou úpravou změněna rázová houževnatost a pevnost.

Nicméně i některé mechanické vlastnosti se zlepšují vlivem teplené modifikace – např. modul pružnosti (omezeno teplotou cca 160 °C).

- Rázová houževnatost

Úbytek rázové houževnatosti u termicky modifikovaného dřeva je velmi výrazný. Při úpravách dřeva v teplotách okolo 150 °C dosahuje až 90 % úbytku. S klesající teplotou je úbytek rázové houževnatosti menší – při ohřevu dřeva na 100 °C je to zhruba 60 %. Pokles rázové houževnatosti způsobuje evidentní křehkost Thermowoodu. Snížení rázové houževnatosti ještě více umocňuje přítomnost kyseliny sírové při termické úpravě (Bučar and Merhar 2015).

- Ohybová pevnost

S rostoucí teplotou termické modifikace klesá ohybová pevnost dřeva. Při úpravě v teplotách okolo 220 °C po dobu 5 hodin spolu s etapami přehřevu a následného chlazení se v celkovém čase úpravy dřeva, sníží ohybová pevnost až o 50 % (Bengtsoon *et al.* 2002).

Pokles ohybové pevnosti se při termické úpravě pohybuje mezi 5–30 %. Někdy je ovšem možné dosáhnout změn ve výši až 50 %. Existují způsoby, jak těmto velkým změnám v ohybové pevnosti předejít. První způsob je ten, že teplota dlouhodobě nepřekračuje hodnotu 200 °C a současně se omezí přístup vzduchu. Pokud se teplota zvýší dlouhodobě nad 220 °C, ohřev se musí uskutečnit bez přítomnosti kyslíku (Kocaefe *et al.* 2007).

- Tlaková, tahová a smyková pevnost

Na základě termické úpravy se mění i jednotlivé pevnosti dřeva:

- tahová pevnost se snižuje podobně jako pevnost v ohybu,
- tlaková pevnost podél vláken se u thermowoodu výrazně nemění, respektive může i narůstat (doloženo ve výzkumném ústavu VTT ve Finsku, a to na smrkových vzorcích upravovaných teplotou 220 °C po dobu trvání 1 až 3 hodiny),
- smyková pevnost dřeva v tangenciálním a radiálním směru klesá v silné závislosti na druhu dřeviny. V případě smrku a borovice upravených teplotami 190 až 230 °C, se zjistil pokles v rozmezí 1 - 40% (Reinprecht and Vidholdová 2011).

- Modul pružnosti

Při tepelné úpravě nižšími teplotami (cca okolo 160 °C) a kratších časových intervalech ohřevu se modul pružnosti dřeva zvyšuje. Naopak při působení vyšších teplot (cca okolo 220 °C) se modul pružnosti dřeva snižuje, avšak není to tak znatelné snížení v porovnání se snížením pevnosti dřeva (Thermowood Handbook 2003).

- Tvrdost

Tvrdost dřeva se s narůstající teplotou ohřevu (v rozsahu 100–240 °C) nemění, nebo se dokonce mírně zvyšuje. Z praktického hlediska je však toto zvýšení zanedbatelné. Pro stanovení tvrdosti termicky upraveného dřeva se používá metoda měření podle Brinella, kdy se do dřeva vtlačuje ocelová kulička o průměru 10 mm. Poté se měří otisk kuličky ve dřevě. Síla vtlačování se určuje podle tvrdosti dřeviny (pro měkké dřeviny se používá síla 100 N, pro středně tvrdé síla 500 N a pro tvrdé dřeviny síla 1000 N). Pro termicky upravené dřevo platí, že jeho tvrdost se zvyšuje v závislosti na vzrůstající teplotě úprav (Thermowood Handbook 2003).

4 Požární testování

Požární testování je úzce spjato se zkoumáním hoření, s rozvojem materiálů a jejich následujícími protipožárními úpravami (Krajčovičová *et al.* 2009). Výsledkem požárního testování je rozřídění materiálů do jednotlivých skupin a hodnocení stupně požární odolnosti při použití protipožárních úprav. Hlavním kritériem při hodnocení protipožárních úprav je zvýšení požární odolnosti. Výsledky zkoušek jsou základem srovnávání účinnosti a kvality jednotlivých provedených protipožárních úprav (Osvald 2017).

4.1 Současně platné ČSN

Obrat v zaměření technické normalizace po roce 1989 znamenal uzavření asociační dohody nejprve ČSFR a posléze České republiky s EU. Z této dohody vyplynul závazek přebírat do národní soustavy normy evropské, a to za současného rušení konfliktních ustanovení norem národních. Kromě toho jsou do české národní soustavy přejímány i navazující normy mezinárodní, přičemž tvorba národních norem je omezena na nezbytné minimum. Cílem normalizace se stává podpora tržního hospodářství a harmonizace národní legislativy s evropskou a také odstraňování technických překážek obchodu (Potůček 2015).

Dnes jsou české státní normy opět dobrovolné. O jejich vydávání, aktualizaci a harmonizaci s normami evropskými se již nestará Český normalizační institut (ČNI), nýbrž Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), který tuto povinnost přebрал na základě rozhodnutí Ministerstva průmyslu a obchodu od 1. 1. 2009.

Tématem požární bezpečnosti se podrobně zabývá norma ČSN EN ISO13943 (2001). Tato norma vysvětluje všechny pojmy týkající se požární problematiky. Termín hořlavost v tomto slovníku není uveden, resp. není definován ani jako mechanická či fyzikální veličina, ale i přesto se jedná o důležitý pojem. Je zde definován pouze termín hoření ve smyslu exotermické reakce látky s oxidovadlem. Tento slovník nám pouze vysvětluje chování látek při hoření – při fyzikálních nebo chemických změnách, k nimž došlo při vystavení předmětu stanovenému zdroji vznícení.

Klasifikací jednotlivých stavebních výrobků a konstrukcí staveb se zabývá norma ČSN-EN-13501-1 (2003) Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí

staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň. Jejím cílem je klasifikovat stavební výrobky v reakci na oheň. Nalezneme zde podrobný postup, jak jednotlivé stavební výrobky rozřadit do skupin v závislosti na jejich reakci na oheň. K dispozici je 7 skupin: A1, A2, B, C, D, E, F. Do skupiny A1 patří výrobky, které nepřispívají k šíření požárů v žádné jeho fázi.

U výrobků zařazených do dalších skupin se požární odolnost postupně snižuje, přičemž skupina F obsahuje výrobky, u nichž nebyla zjištěna žádná požární odolnost, nebo nebyly podle této normy vůbec klasifikovány. Podle této normy můžeme každou skupinu klasifikovat ještě doplňkově. Jedná se o doplňkovou klasifikaci podle tvorby kouře (skupiny s1 – s3) nebo podle plamenně hořících kapek neboli částic (skupiny d0 - d2), (Potůček 2015).

Norma ČSN EN 13501-1 (2003) určuje 4 zkoušky, které jsou podrobně popsány v konkrétních normách:

1. Zkouška nehořlavosti (ČSN EN ISO 1182 2010)

Pomocí této zkoušky jsou určovány výrobky, které k požáru nebudou přispívat nebo k němu budou přispívat pouze nevýznamně, a to bez ohledu na způsob jejich konečného použití. Zkouška se využívá pro klasifikaci stavebních výrobků do tříd A1, A2.

2. Zkouška jednotlivým hořícím předmětem SBI (ČSN EN 13823, 2010)

Touto zkouškou se hodnotí příspěvek výrobku k rozvoji požáru, pokud je tento vystaven tepelnému účinku odpovídajícímu jednotlivému hořícímu předmětu umístěnému v rohu místnosti v blízkosti zkoušeného výrobku. Zkouška se využívá pro klasifikaci do tříd A2, B, C a D. Za podmínek stanovených v 8.3.2 je využitelná taktéž pro klasifikaci do třídy A1.

3. Zkouška zápalnosti (ČSN EN ISO 11925-2 2011)

Zkouškou zápalnosti se stanoví zápalnost výrobku vystaveného působení malého plamene. Zkouška se využívá pro klasifikaci do tříd B, C a D, E.

4. Stanovení spalného tepla (ČSN EN ISO 1716 2010)

Při této zkoušce se stanovuje maximální množství tepla uvolněného při shoření celého výrobku, a to bez ohledu na způsob jeho konečného použití. Podle výsledků jednotlivých materiálů v těchto zkouškách pak probíhá samotné zařazení do konkrétních skupin (Potůček 2015).

4.2 Reakce dřeva thermowood na hoření

Vlivem tepelných úprav při výrobě termicky modifikovaného dřeva dochází k chemickým změnám, které mají za následek nepatrné zhoršení požární odolnosti thermowoodu vzhledem ke dřevu rostlému. Podle současných norem bylo dřevo thermowood zařazeno do skupiny D – s1 d0. Norma skupinu D charakterizuje jako:

- výrobky vyhovující kritériím pro třídu E a schopné odolávat působení malého plamene po delší časový interval bez významného rozšíření plamene. Kromě toho jsou také schopny odolat působení tepla od jednotlivého hořícího předmětu za podstatného zpoždění a omezení uvolňování tepla (ČSN EN 13501-1 2003).
- Doplnková klasifikace s1 splňuje nejpřísnější požadavky pro tvorbu kouře. Doplnková klasifikace d0 znamená, že se při hoření neobjevují žádné plamenně hořící kapky nebo částice.

Termicky upravené dřevo thermowood je tedy klasifikováno ve skupině D. Proto, aby tento výrobek mohl být zařazen do třídy D, bylo nutné podrobit jej podle normy ČSN-EN-13501-1 (2003) jednak zkoušce zápalnosti malým zdrojem plamene (ČSN EN ISO 11925-2 2011) a jednak také zkoušce jednotlivým hořícím předmětem SBI (ČSN EN 13823 2010).

1. Zkouška zápalnosti tělesa malým zdrojem plamene

Tato zkouška (ČSN EN 11925-2 2011) probíhá ve zkušební místnosti, jejíž součástí je zkušební komora s držákem zkušebního tělesa. Účelem zkušební komory je umožnit pozorování tělesa během zkoušky. Přesné parametry zkušební komory určuje norma. Zkušební těleso o rozměrech 250 x 90 mm je umístěno v držáku ve zkušební komoře. K tomuto tělesu je přisunut plynový hořák, který má výšku plamene seřízenou

na 20 mm. Jako palivo se do hořáku používá čistý propan o minimální čistotě 95 %. Hořák je k tělesu přisouván pod úhlem 45° ke své svislé ose – přitom je nutné, aby se plamen přesně dotkl pouze předem určeného místa na zkušebním tělese. Od prvního dotyku plamene se začne počítat doba 30 sekund. Po tuto dobu působí plamen na povrch tělesa a pozoruje se jeho chování a případná tvorba plamenně hořících kapek či částic. Poté se plynový hořák oddálí plynulým pohybem. A dále se po dobu 60 sekund sleduje, zda se na tělese objeví rozšíření plamene (Potůček 2015).

Úspěšný výsledek výrobků thermowood při zkoušce zápalnosti malým zdrojem plamene znamená, že nedošlo k zapálení tělesa; současně při 30 s. působení plamene na povrch a na hranu tělesa nebylo zaznamenáno žádné rozšíření plamene přesahující vzdálenost 150 mm ve svislém směru od místa dotyku zkušebního plamene, a to do 60 s. po ukončení působení zkušebního plamene (ČSN EN 13501-1 2003). Rovněž nebyly pozorovány žádné trvale plamenně hořící částice či kapky.

Po úspěšném výsledku této zkoušky se musí materiál podrobit ještě zkoušce jednotlivým hořícím předmětem SBI (ČSN EN 13823 2010). Až výsledky této zkoušky rozhodnou, zda bude materiál zaříděn do třídy B, C nebo D.

2. Zkouška jednotlivým hořícím předmětem SBI

Také tato zkouška (ČSN EN 13823 2010) se provádí ve zkušební místnosti, která musí být plně vybavena. Podrobný popis místnosti a veškerého zařízení stanoví norma.

Povinné součásti vybavy jsou:

- vozík, na němž jsou umístěny dvě kolmé části zkušebního tělesa spolu, s pískovým hořákem na úrovni spodních hran rohu zkušebního tělesa,
- pevný rám, který má na sloupku umístěn druhý pískový hořák a drží, odsávací zvon,
- hořák, jenž jako palivo používá propan o minimální čistotě 95%,
- odsávací zvon se sběračem, ve kterém se shromažďují plynné zplodiny,
- hoření,
- potrubí a systém pro odvod kouře ze zkušební místnosti,
- souhrnné měřicí zařízení, které zapisuje výsledné hodnoty.

Zkušební těleso umístěné na vozíku se skládá ze dvou křídel, která vytvářejí rohový spoj (rozměry menšího křídla jsou 495×1500 mm a rozměry většího křídla jsou 1000×1500 mm). Na čelní straně dlouhého křídla musí být nakresleny dvě vodorovné čáry tak, aby bylo možné pozorovat boční šíření plamene. Sestavení probíhá v souladu s nasimulováním co nejněžšího konečného použití (Potůček 2017).

3. Další metody na určení vlastností souvisejících s požární odolností

ISO 5660 test stanovení rychlosti uvolňování tepla a produkce kouře, který využívá metody kónické kalorimetrie a stanovení probíhá v konickém kalorimetru (Potůček 2017).

- test při hustotě toku sálavého tepla toku 50 kW/m^2
 - byl prováděn na 4 vzorcích borovicového dřeva o rozměrech 50×150 mm. První vzorek nebyl podroben žádné předchozí teplené úpravě. Další tři vzorky byly upraveny při $230 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 5,8 a 10 hodin. V tabulce č. 3 je zaznamenána rychlost uvolňování tepla RHR, produkce kouře (Smoke), doba zapálení a váhový úbytek.
- test při hustotě toku sálavého tepla 25 kW/m^2
 - byl prováděn na 2 vzorcích smrkového dřeva o rozměrech 50×150 mm. První vzorek nebyl podroben žádné předchozí teplené úpravě. Druhý vzorek byl upraven při $230 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 8 hodin. V tabulce č. 4 je zaznamenána rychlost uvolňování tepla RHR, produkce kouře (Smoke), doba zapálení a váhový úbytek (Thermowood Handbook 2003).

NF B 52501 standart

Testy jsou v tomto případě prováděny pomocí CTBA. Příkladem pro zařazení je třída M3. Výsledky testů naznačují, jaká požární odolnost tepelně ošetřeného dřeva musí být brána v úvahu, aby byla stejná jako požární odolnost neošetřeného dřeva odpovídajícího druhu (PROKOM 2013).

Test to British standart BS Part 7

Podle tohoto testu bylo termicky upravené dřevo zařazeno do 3. třídy odolnosti proti povrchovému šíření plamene (Potůček 2017).

4.2.1 Chemické reakce vznikající vlivem tepelného působení

Při hoření i při působení tepla na dřevo se mění jeho chemické složení, jehož základ tvoří:

- celulóza (tvoří 40 – 50 % dřeva),
- hemicelulóza (25 – 35 %),
- lignin s obsahem 22 % ve dřevě.

Vedlejší složky dřeva tvoří výtažky (cca 5 %). Přesný poměr zastoupených látek je závislý na konkrétní dřevině (Potůček 2017).

Dehydratace, depolymerizace, statická degradace a termooxidace jsou typy chemických reakcí, které probíhají při termické degradaci dřeva. V jejich důsledku dochází ke změně pevnostních vlastností dřeva, k poklesu relativních molekulových hmotností celulózy, hemicelulózy i ligninu, dále k aktivní degradaci sacharidového podílu, a nakonec k bezplamennému i plamennému hoření (Kačíková *et al.* 2010).

Termicky upravené dřevo thermowood tak můžeme v souvislosti s jeho tepelnou úpravou považovat za již částečně tepelně degradované. Výroba thermowoodu probíhá v pásmu tepelného zatěžování do 300 °C.

Rychlost degradace při tepelné úpravě pod 100 °C je nízká (dolní hranici počátku termické degradace není možné udat). Termická degradace dřeva se při těchto nízkých teplotách projevuje úbytkem hmotnosti, změnami komponentů v lignin sacharidové matici a změnami fyzikálních a mechanických vlastností dřeva (Kačíková *et al.* 2010).

Vzhledem k limitní teplotě 300 °C při výrobě termicky upraveného dřeva thermowood můžeme podle Shazifideha (1984) uvést tyto termolytické reakce hlavních složek dřeva:

- dehydratace,
- štěpení vazeb v makromolekulách polysacharidů,

-
- štěpení C-C alkyl-alkylových vazeb a C-O-C4 alkyl-aryl-arylových éterových vazeb v ligninu,
 - štěpení fenyglykozidových vazeb mezi ligninem a hemicelulózami,
 - vytvoření oxidů uhlíku (CO a CO₂ a funkčních skupin – karbonylových, karboxylových a hydroperoxidových (Kačíková *et al.* 2006).

Tyto chemické změny vznikají při výrobě thermowoodu. V případě, že dojde k vyššímu teplotnímu zatížení způsobenému například hořením, probíhají ještě další chemické reakce. Se vzrůstající hodnotou tepelného zatížení se mechanické vlastnosti dále zhoršují.

Při teplotách nad 300 °C probíhají tyto další reakce:

- depolymerizace celulózy různými mechanismy za vzniku rozličných monomerních produktů,
- štěpení vazeb C-C, C-O-C a jiných za vzniku různých nízkomolekulových prchavých látek (H₂O, CO, CO₂, CH₃OH, CH₂O, CH₃COH atd.),
- repolymerizace rozkladných meziproduktů celulózy a ligninu za tvorby kondenzovaných látek typu dehet a s vysokým podílem uhlíku – uhlík se koncentruje do kondenzovaných aromatických jader a grafitových struktur (Kačíková *et al.* 2010).

4.2.2 Chemické změny hlavních složek dřeva při působení tepla

Jako první se při termickém působení na dřevo začínají měnit hemicelulózy. Jejich degradace začíná deacetylací a vznikající kyselina octová působí jako depolymerizačních katalyzátor reakcí. Dále pak urychluje rozklad polysacharidů. Kyselou katalyzované reakce vedou ke vzniku formaldehydu, 2-furaldehydu a dalších aldehydů (Kačíková and Kačík 2011).

Dalšími produkty vznikajícími při termické degradaci jsou methanol a některé prchavé heterocyklické sloučeniny.

V porovnání s hemicelulózami je celulóza díky své krystalické struktuře odolnější. Určitým změnám, jejichž rozsah je závislý na hodnotě působící teploty, podléhá i celulóza (složka s nejvyšším podílem zastoupení ve dřevu). Ovšem díky své

krystalické struktury je tato (v porovnání s hemicelulózami) vůči termickému působení odolnější. Při pyrolýze dochází k poklesu molekulové hmotnosti celulózy, která má za následek snížení pevnostní charakteristiky dřeva.

Při zahřívání celulózy v rozsahu teplot 120 až 350 °C probíhají nejméně tři primární reakce: termooxidace, dehydratace a depolymerace spojená s tvorbou glykozanů. Výsledek procesu ve značné míře ovlivní paralelní průběh těchto reakcí. Termooxidace a dehydratace jsou kontrolované difúzními procesy a probíhají především v amorfních podílech polysacharidů. Všeobecně se předpokládá, že termooxidace probíhá staticky radikálovým řetězovým mechanismem. Současně dochází k depolymerizaci celulózy, která se zastaví na hodnotě PPS 170–190 (Kačíková *et al.* 2010).

Při teplotách nad 300 °C se makromolekula celulózy dostává do flexibilnějšího stavu. Ten umožňuje, aby se dominantní degradační reakcí celulózy stala její depolymerizace mechanismů transglykozidace za tvorby levoglukózanu. Ten vzniká z krystalické celulózy. Při dalším zvyšování teploty do 500 °C přednostně probíhají buď reakce, při kterých se levoglukózan proměňuje na CO, CO a H₂O, anebo reakce vedoucí spíše k tvorbě dehtových 2–2 látek a zuhelnatěného zbytku (Shafizadeh 1984, Kačíková *et al.* 2010).

Při teplotách nad 200 °C pak vzniká levoglukózan, 1,2 a 1,4-anhydroglukóza a 1,6-anhydroglukofuranóza, furan a jeho deriváty. Při termické degradaci celulózy může vznikat i důležitá sloučenina 2 - furaldehyd. Jeho vznik se vysvětluje buď pyrolýzou anebo hydrolyzou glukózy. Pyrolýza glukózy na 2 furaldehyd vyžaduje ztrátu dvou molekul vody a jedné molekuly formaldehydu (Kačíková *et al.* 2010).

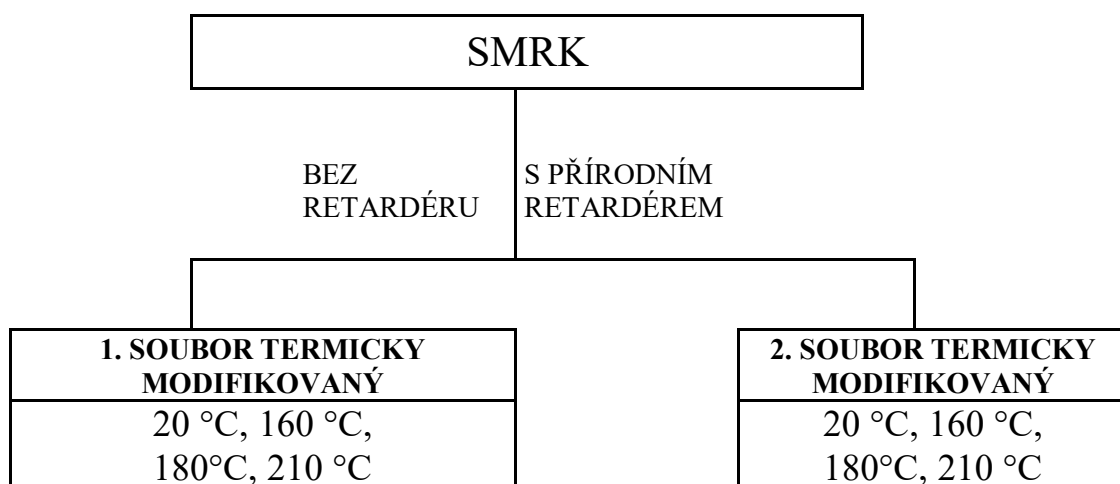
Díky své benzenoidní struktuře má největší termickou odolnost lignin. Při termické degradaci dřeva dochází k vysokému výtazku uhlí a k relativně nízkému obsahu prchavých produktů.

Suchý lignin zahříváním vytváří tvrdou živici a vlhký lignin tvoří měkkou plastickou látku. Převážná část ligninu je vůči teplu rezistentní. K mírné degradaci ligninu dochází již při nižší teplotě než u polysacharidů. Potom však lignin uhelnatí na těžko zapalitelný produkt, takže skutečně hořlavými látkami ve dřevě jsou polysacharidy.

Při termickém působení se do teploty 300 °C štěpí C-C vazby v alifatickém řetězci fenylypropanových C9 jednotek ligninu. Dále se lignin depolymerizuje s možností uvolnění monomerních fenolů. Poté dochází ke štěpení fenylyglykozidových vazeb, které spojovaly lignin s hemicelulózami. Nad 300 °C se C-C vazby dále štěpí. Současně se štěpí i vazby mezi benzenovým jádrem a methylovou skupinou. Rozkládá se fenylykumaránový kruh. Pak probíhá uspořádávání atomů uhlíku v zuhelnatěném zbytku do grafitové struktury (Kačíková *et al.* 2010).

5 METODIKA EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

Výzkum se skládal z pozorování a porovnávání dvou základních zkušebních souborů. První skupinu vzorků sestávala z termicky upraveného smrku (*Picea abies* L.), při teplotách 160 °C, 180 °C, 210 °C (vzorky S-160, S-180 a S-210) a neupraveného smrkového dřeva (označení S-20). Tato první skupina nebyla ošetřena retardérem. Druhý soubor zkušebních těles byl složen z termicky upraveného smrku (*Picea abies* L.), při teplotách 160 °C, 180 °C, 210 °C (vzorky S-160, S-180 a S-210) a neupraveného smrkového dřeva (označení S-20). Druhá skupina zkušebních těles byla modifikována přírodním retardérem – Arabinogalaktánem (Čékovská *et al.* 2017).



Obr. 8. Blokové schéma testovaných dřevěných vzorků

Proces termické modifikace probíhal podle:

- Pálení a sušení – v této fázi se rapidně zvyšuje teplota v peci na přibližně 100 °C, a to je dále podpořeno působením páry. Poté proměnlivě klesá obsah smoly u dřevního vzorku a opět se navyšuje při dosažení teploty 130 °C. Jako sušící medium jsou použity teplý vzduch a nebo vodní pára. Po celou dobu průběhu této fáze je dřevo vysoušeno přibližně na nulovou vlhkost.
- Termická modifikace – ve druhé fázi je teplota navýšena na úroveň 185 °C až 230 °C po dobu 2-3 hodin. Vyšší teplota a doba trvání je dána požadavky třídy výrobku THERMOWOOD (Thermo – S a Thermo – D).

- Chlazení a klimatizace - ve třetí fázi termické úpravy je dřevo postupně chlazeno na teplotu 80 °C - 90 °C a vlhkost vzduchu je ustálena tak, že finální úroveň vlhkosti dřeva je normálová v rámci průměru mezi 4-7%.

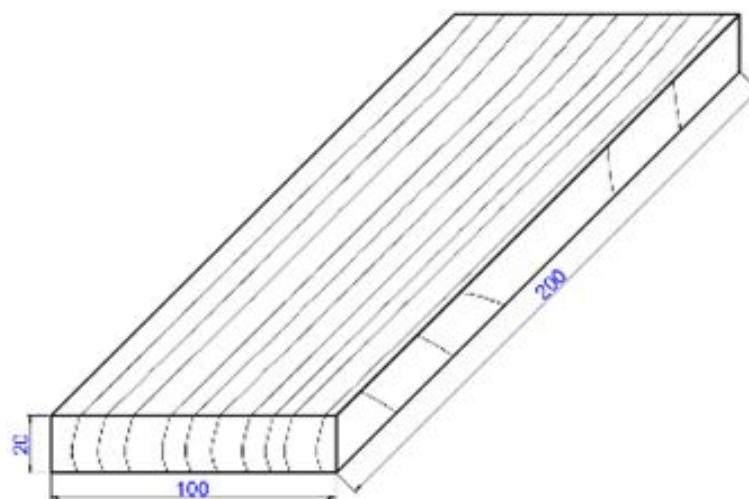
Tab. 7. Vstupní technologické parametry a proces termické modifikace

	Vstupní technologické parametry		
Vlhkost dřeva	2 to 4 %		
Kapacita pece	0.8 m ³		
Maximální dosažená teplota	210 °C		
	Proces termické modifikace		
	160 °C	180 °C	210 °C
Pálení	6.3 hod.	4.5 hod.	4.8 hod.
Termický proces	4.4 hod.	5.3 hod.	6.7 hod.
Chlazení	1.7 hod.	2.4 hod.	4.2 hod.
Celkový čas modifikace	12.4 hod.	12.2 hod.	15.7 hod.

Obrázek č. 8 znázorňuje zkušební tělesa použitá na testování sledovaných vybraných charakteristik.



Obr. 9. Zkušební tělesa (S-210, S-180, S-160 a S-20)



Obr. 10. Rozměry zkušební tělesa pro použití při testování

Průměrná hustota sledovaných souborů zkušebních těles je uvedena v tabulce č. 8.

Tab. 8. Průměrné hodnoty hustoty zkušebních vzorků

Testovaný vzorek	S 20	S 160	S 180	S 210
Hustota (kg.m^{-3})	447	645	452	430
Obsah vlhkosti (%)	2.9	2.8	2.8	2.8

5.1 Metody výzkumu

Pro zjištění vlastností ve vztahu k hoření termicky upraveného dřeva jsme navrhli zcela novou metodu hodnocení. Tato metoda se skládá z přímého působení plynového hořáku na zkušební těleso za určitý čas ($t = 10 \text{ min.}$). Schéma zařízení je na obrázku (obr. 10.). Zkušební těleso je umístěné pod úhlem 45° oproti vodorovné rovině. Velikost plamene plynového hořáku je 10 cm od ústí hořáku, který je umístěn uprostřed pod zkušební těleso. Základní měření probíhá po dobu 10 minut.

V naší metodě jsme pokračovali částí zkoušky, kdy jsme odsunuli plamen od vzorků a zaznamenávali jsme úbytek na hmotnosti a rychlost odhořívání po dobu dalších 5 minut. Prodloužením času (t) o dalších 5 minut, jsme zjišťovali průběh odhořívání, protože jsme předpokládali, že ve vrstvě dřevěného uhlí a zuhelnatění, bude nadále pokračovat degradace dřeva a může tak dojít i k opětovnému vznícení a vzplanutí. Metoda simuluje přirozený proces hoření dřeva s plamenným zdrojem, trvalým přístupem vzduchu a volným prouděním spalin.

Jako zdroj hoření byl použit kahan typu USBEC 1011/1 propan, DIN – DVGW – Reg.Mr. NG – 2211AN0133, blastung 1,7 kW. Hmotnost se zjišťovala na váhách Mettler Toledo typ NEW CLASSIC MF, model MS 1602 S/MO1 (Mettler Toledo, Swisse). K zaznamenání průběhu úbytku váhy se využil software BalanceLink (Mettler Toledo, Swisse).

V průběhu testu hořlavosti jsme zaznamenávali průběžným vážením pomocí softwaru BalanLink úbytek hmotnosti v intervalu 10 sekund. Z naměřených hodnot můžeme zjistit úbytek na hmotnosti (eq. 3) a průměrnou rychlost odhořívání (eq. 4). Výsledky rychlosti odhořívání jsou zpracovány v grafech. Průběh odhořívání popisuje rychlost odhořívání v průběhu 15 minut.

Podle procentuálního úbytku hmotnosti vzorků jsme určili třídu reakce na oheň podle ČSN 73 0810 včetně znění pozdějších novelizací z roku 2016. U materiálů zařazených do třídy reakce na oheň A-nehořlavé, B-nesnadno hořlavé a C1-těžce hořlavé nesmí dojít k celkovému vzplanutí a plamen se na nich nesmí šířit anebo jen omezeně. Při zařazení do tříd reakcí na oheň C2-středně hořlavé, C3-lehce hořlavé, je velmi důležitá otázka rychlosti vývoje požáru, ale i šíření plamene hořáku po dobu 15-30 s (Reinprecht 2012, ČSN 73 0862–2003).



Obr. 11. Schéma zařízení na test hořlavosti podle ČSN (ČSN 73 0862, 2003)

5.2 Vyhodnocení naměřených dat

K určení vlivu jednotlivých faktorů na ohybové charakteristiky byla provedena analýza rozptylu (ANOVA) a test Fischer F pomocí softwaru Statistica 12 (Statsoft Inc., USA). Hustota dřeva byla stanovena před a po testování vzorků podle ISO 13061-2 (2014) a eq. 1.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (1)$$

Kde ρ_w je hustota vzorku při obsahu vlhkosti w (kg/m^3); m_w je hmotnosti dřevěného vzorku při obsahu w (kg); a_w , b_w a l_w jsou rozměry vzpěry vzorku při obsahu vlhkosti w (m); a V_w je objem vzorku při obsahu vlhkosti w (m^3). Obsah vlhkosti ve vzorcích byl stanoven a ověřen před a po testování. Tyto výpočty byly provedeny podle ISO 13061-1 (2014) a eq. 2.

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (2)$$

Kde w je obsah vlhkosti ve vzorcích (%), m_w je hmotnost dřevěného vzorku při obsahu vlhkosti w (kg) a m^0 je hmotnost vzorku v sušárně (kg). Proces sušení v sušárně byl proveden také podle ISO 13061-1 (2014).

Hlavním kritériem hodnocení je úbytek hmotnosti zkušebních těles, který se vypočítá podle rovnice (eq.3).

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Kde Δm je úbytek na hmotnosti (%), m^1 hmotnost vzorku před zkouškou (g), m^2 hmotnost vzorku po zkoušce (g).

Tab. 9. Rozdělení do stupňů hořlavosti

Úbytek hmotnosti (%)	Stupeň hořlavosti stavebních hmot podle ČSN 73 0810	
do 2,00	A	Nehořlavé
2,1 - 5,0	B	velmi těžko hořlavé
5,1 - 10,0	C1	těžko hořlavé
10,1 - 50,0	C2	středně hořlavé
nad 50,0	C3	lehce hořlavé

Na základě procentuální hodnoty podle vypočtené rovnice (eq. 3.) se materiály zařadily do třídy reakce na oheň tak, jak nám ukazuje tabulka č. 9

Rychlost odhořívání jsme si vypočetli podle rovnice (eq. 4).

$$v = \frac{m_t - m_{t+10}}{m_{t0} \cdot 10} \cdot 100 \quad (4)$$

kde v je rychlost odhořívání (%. s-1), m_t je hmotnost (g) v čase t , m_{t+10} je hmotnost (g) vzorku o 10 sekund více a m_{t0} je hmotnost (g) vzorku v čase 0.

6 VÝSLEDKY A DISKUSE

6.1 Zpracování výsledků v softwaru Statistica 12

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita vícefaktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich dvou, tří nebo čtyř vzájemných kombinací. K tomuto ohodnocení účinku jednotlivých faktorů i jejich vzájemnou kombinací byl použit Fischerův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Podle hodnoty P lze testovaný faktor ohodnotit takto:

- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$ faktor působí,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný,
- hodnoty závislé proměnné, pokud jsou všechny ostatní vysvětlující proměnné hypoteticky nulové, je v tabulkách označena jako Intercept.

6.2 Porovnání a zhodnocení experimentálně získaných dat

V následujících podkapitolách je vyhodnocen účinek sledovaných faktorů na jednotlivé veličiny – úbytek hmotnosti, rychlost hoření, maximální rychlost hoření, doba k dosažení maximální rychlosti hoření a DR.

6.2.1 Úbytek hmotnosti

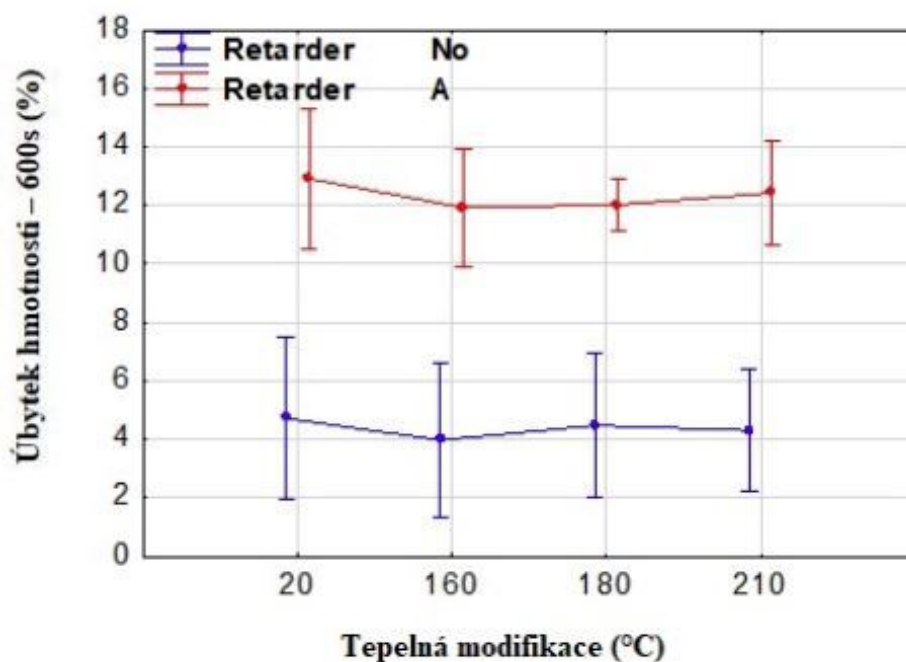
Vzhledem k hodnotám hladiny významnosti jsou pro nás sledované faktory (barevně vyznačeny) statisticky velmi významné – viz tabulka 10.

Tab. 10 . Úbytek hmotnosti (%)

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Odchylka	Fischerův F – Test	Úroveň významnosti P
Intercept	2787,263	1	2787,263	878,248	***
Úprava dřeva retardéry proti hoření	3,86	3	1,287	0,405	NS
Termická modifikace	632,646	1	632,646	199,342	***
Termická modifikace*Úprava dřeva retardéry proti hoření	0,619	3	0,206	0,065	NS
Chyba	101,557	32	3,174		

Pozn.: NS=nevýznamné, ***=významné

Obrázek č. 11 nám ukazuje dvě křivky. Modrá křivka sleduje vztah mezi hmotností vzorků dřeva bez ošetření retardéru na termické modifikaci. Červená křivka sleduje závislost ztráty hmotnosti vzorků dřeva ošetřených retardérem na tepelné modifikaci. Na obrázku je sledován vztah mezi úbytkem hmotnosti (%) za 600 s vůči tepelné modifikaci (°C). Z porovnání obou křivek je zřejmý rozdíl v úbytku hmotnosti dřevěných vzorků s aplikovaným retardérem a se dřevěnými vzorky bez aplikovaného retardéru. Vzorky s aplikovaným retardérem mají při termické modifikaci (20 °C–210 °C) oddálený úbytek hmotnosti v závislosti na čase oproti dřevěným vzorkům bez aplikace retardéru. Nejrychleji dřevěné vzorky s retardérem ubývají na hmotnosti při tepelné úpravě 160 °C. Naopak nejpomalejší úbytek hmotnosti byl pozorován při termické úpravě 20 °C a 210 °C, kdy se úbytek hmotnosti prakticky neposouvá. Průměrné hodnoty ztráty hmotnosti vzorků dřeva neošetřeného retardérem jsou nejvyšší u vzorků upravených nižší tepelnou modifikací – na 20 °C a 180 °C. Nejlepších výsledků - co se požárních vlastností týče – podle údajů z grafu dosahují ty dřevěné vzorky, které byly tepelně modifikovány teplotou 180 °C u aplikovaného retardéru a 210 °C u dřevěných vzorků bez aplikovaného retardéru.



Obr. 12. Závislost úbytku hmotnosti (%) na tepelné modifikaci (600 s) u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření

6.2.2 Rychlost hoření

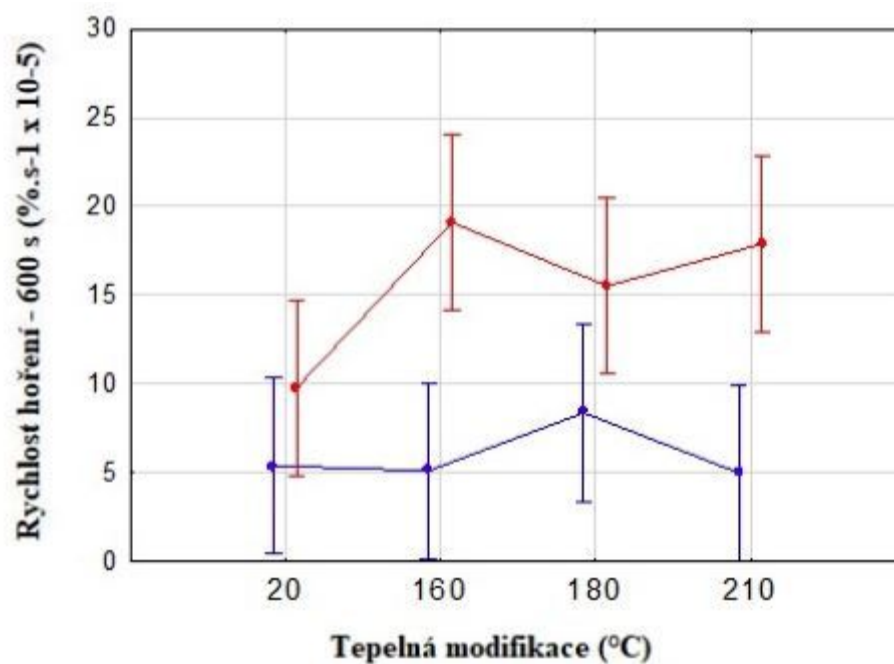
Z tabulky (tab. 11.) můžeme vypořadovat, že sledovaný faktor hladiny významnosti P se jeví jako faktor na hraně statistické významnosti.

Tab. 11. Rychlost hoření (% \cdot s $^{-1}$ x 10 $^{-5}$) za 600 s

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Odchylka	Fischerův F – Test	Úrovně významnosti P
Intercept	4646,719	1,000	4646,719	156,544	***
Úprava dřeva retardéry proti hoření	137,049	3,000	45,683	1,539	NS
Termická modifikace	922,8	1,000	922,8	31,088	***
Termická modifikace*Úprava dřeva retardéry proti hoření	157,853	3,000	52,618	1,773	NS
Chyba	949,864	32,000	29,683		

Pozn.: NS=nevýznamné, ***=významné

Na obrázku č. 12. jsou znázorněny 2 křivky grafu, které poukazují na porovnání průměrných rychlostí hoření vzorků dřeva ošetřeného retardérem proti hoření (červená křivka) s průměrnými hodnotami rychlosti hoření dřevěných vzorků bez aplikace retardéru (modrá křivka), a to v závislosti na tepelné úpravě vzorků. Z obrázku je na první pohled vidět statisticky nevýznamný vztah při započítání termické modifikace (při teplotě 20 °C). Následně se dřevěné vzorky při teplotách 160 °C a 210 °C jeví jako statisticky velice významné a při termické modifikaci (180 °C) jsou průměrné hodnoty na hranici významnosti, jak je patrné z obrázku č. 12. Opět se kladně projevuje účast aplikovaného retardéru, který při termické modifikaci 160 °C odolával rychlosti hoření nejdéle. Naproti tomu nejdříve byla rychlost hoření po 600 s, sledována při termické úpravě 180 °C. Vzorky dřeva bez aplikovaného retardéru měly nárůst při sledovaném vztahu (průměrné hodnoty na obrázku č. 12.) velice rychlý, oproti dřevěným vzorkům s retardérem.



Obr. 13. Závislost rychlosti hoření (%.s-1 x 10-5) na tepelné modifikaci (600s) u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření

6.2.3 Maximální rychlost hoření

Z tabulky (tab. 12.) je patrné, že sledovaný faktor hladiny významnosti P se jeví jako statisticky nevýznamný faktor ovlivňující maximální rychlost hoření za dobu 600 s.

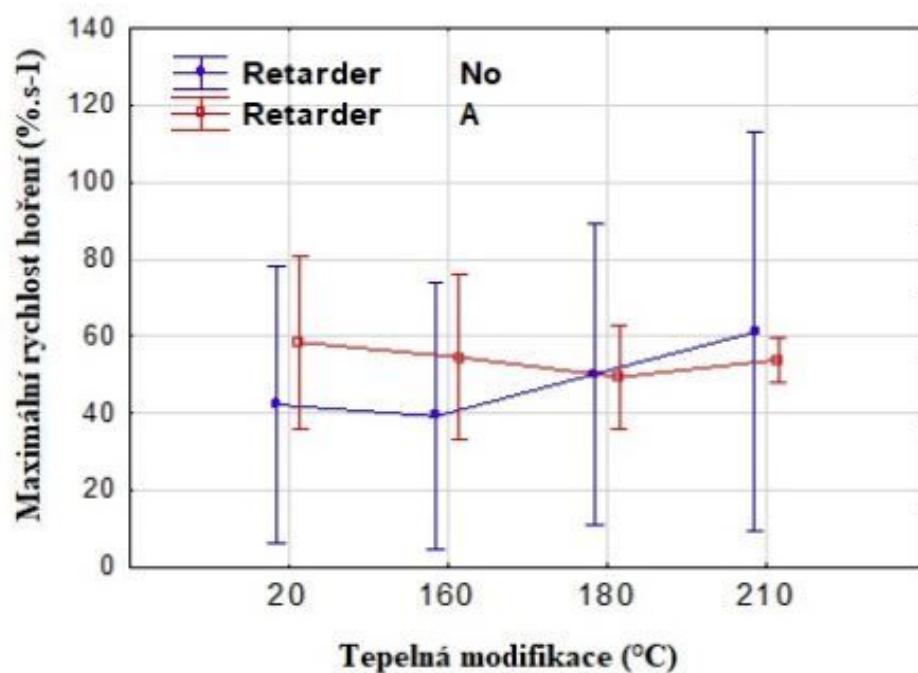
Tab. 12. Maximální rychlost hoření (%.s-1) za 600s

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Odchylka	Fischerův F – Test	Úrovně významnosti P
Intercept	104393,219	1,000	104393,219	162,745	***
Úprava dřeva retardéry proti hoření	611,663	3,000	203,888	0,318	NS
Termická modifikace	345,391	1,000	345,391	0,538	NS
Termická modifikace*Úprava dřeva retardéry proti hoření	1035,198	3,000	345,066	0,538	NS
Chyba	20526,428	32,000	641,451		

Pozn.: NS=nevýznamné, ***=významné

Na obrázku č. 13. je zobrazen průběh průměrných naměřených hodnot za pomoci dvou křivek grafu. Modrá křivka sleduje průběh průměrných maximálních rychlostí hoření vzorků dřeva bez retardérů v závislosti na tepelné modifikaci.

Červená křivka pak značí stejný vztah, ale u vzorků s aplikací retardéru (arabinogalaktánu). Jak už bylo řečeno, tak se průměrné hodnoty obou křivek (červené a modré) staly statisticky nevýznamné a vliv aplikovaného retardéru tedy nebyl pozorován.



Obr. 14. Závislost maximální rychlosti hoření (%.s⁻¹) na tepelné modifikaci (za 600s) u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření

6.2.4 Poměr maximální rychlosti hoření

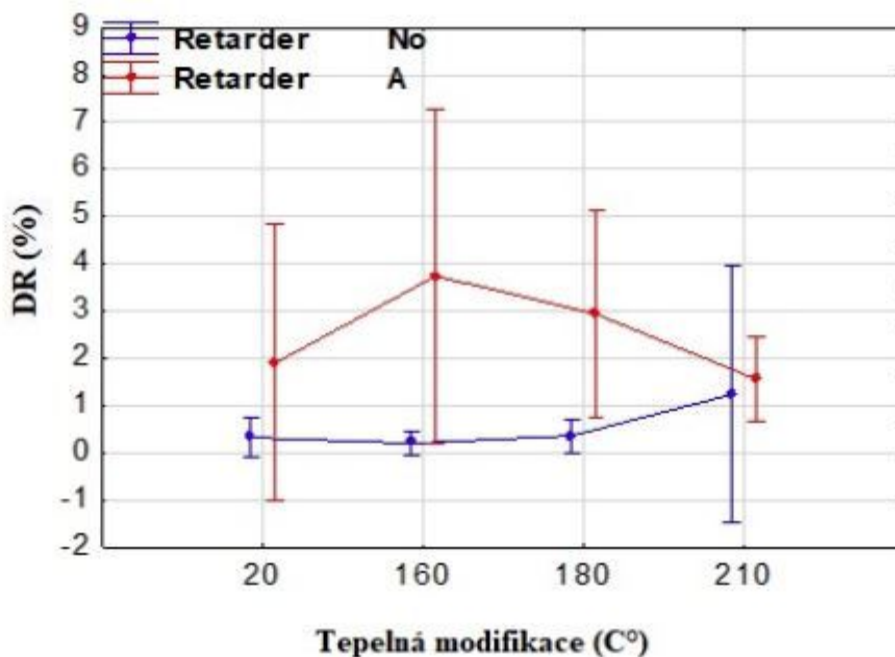
Poměr maximální rychlosti hoření se jeví, dle úrovně statistické významnosti P, jako faktor na hraně statistické významnosti v závislosti na tepelné modifikaci společně s hodnotami nezávislé proměnné (Intercept), jak nám ukazuje tabulka (tab. 13.).

Tab. 13. Poměr maximální rychlosti hoření (%) za 600 s

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Odchylka	Fischerův F – Test	Úrovně významnosti P
Intercept	93,802	1,000	93,802	33,5	***
Úprava dřeva retardéry proti hoření	4,032	3,000	1,344	0,48	NS
Termická modifikace	40,11	1,000	40,11	14,325	***
Termická modifikace*Úprava dřeva retardéry proti hoření	14,336	3,000	4,779	1,707	NS
Chyba	89,602	32,000	2,8		

Pozn.: NS=nevýznamné, ***=významné

Na obrázku č. 14. jsou 2 křivky grafu. Modrá křivka sleduje průběh závislosti průměrných hodnot poměru maximální rychlosti hoření (DR (%)) bez retardérů na tepelné modifikaci (20 °C–210 °C). Červená křivka zachycuje průběh stejné závislosti, ovšem u naměřených průměrných hodnot dřevěných vzorků ošetřených retardérem (arabinogalaktánem). Dle tabulky (tab. 13.) je tento faktor dle hladiny významnosti P statisticky na hraně významnosti. Nicméně jak je patrné z průběhu grafu na obrázku (obr. 14), že statisticky nejlépe vycházejí průměrné hodnoty dřevěných vzorků s aplikovaným retardérem při termické modifikaci 160 °C. U naměřených průměrných hodnot dřevěných vzorků bez aplikovaného retardéru se neprojevuje významnější hodnota až do zvýšení teploty termické modifikace na 210 °C. Nicméně i v tomto bodě sledovaného vztahu má užití retardéru pozitivní dopad na dřevěné vzorky.



Obr. 15. Závislost poměru maximální rychlosti hoření (%) na tepelné modifikaci za 600s u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření

6.2.5 Doba k dosažení maximální rychlosti hoření

Vzhledem k hodnotám hladiny významnosti P jsou pro nás sledované faktory (barevně vyznačeny) z počátku statisticky nevýznamné, ale od termické modifikace

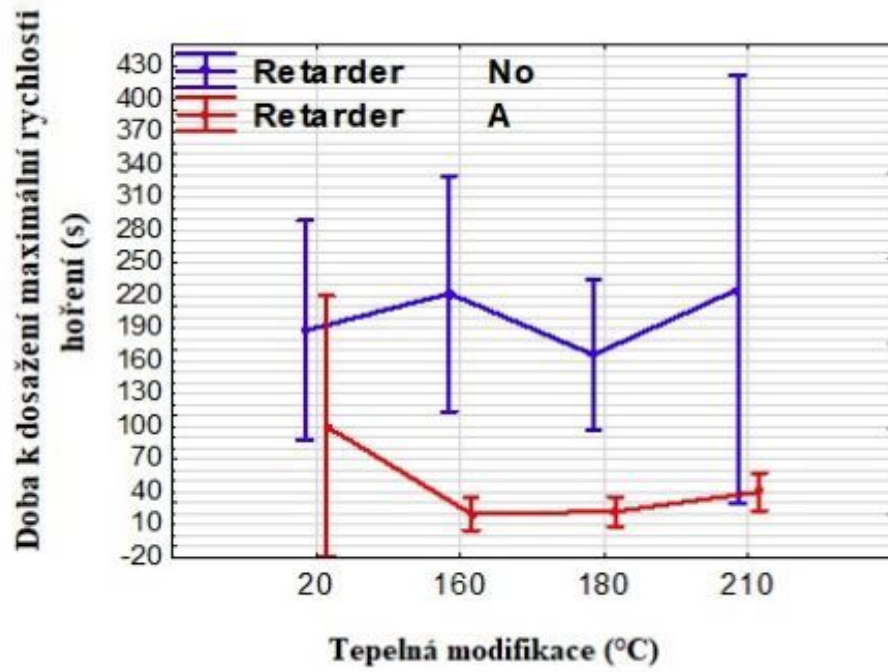
160°C do 180°C, se stává statisticky velmi významný. Následně při tepelné modifikaci (210 °C) se stává opět statisticky nevýznamný – viz tabulka (tab. 14.).

Tab. 14. Doba k dosažení maximální rychlosti hoření (s)

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Odchylka	Fischerův F – Test	Úroveň významnosti P
Intercept	604668,1	1,000	604668,1	93,211	***
Úprava dřeva retardéry proti hoření	13976,3	3,000	4658,767	0,718	NS
Termická modifikace	239940,1	1,000	239940,1	36,987	***
Termická modifikace*Úprava dřeva retardéry proti hoření	19472,3	3,000	6490,767	1,001	NS
Chyba	207587,2	32,000	6487,1		

Pozn.: NS=nevýznamné, ***=významné

Na obrázku č. 15. jsou 2 křivky grafu. Modrá křivka sleduje průběh závislosti průměrných hodnot časů na dosažení maximální rychlosti hoření vzorků dřeva bez retardérů na jejich tepelné modifikaci. Červená křivka zachycuje průběh téže závislosti, ovšem při hoření vzorků ošetřených retardérem. Podle údajů v tabulce 11 je i tento dvou faktor statisticky významný (teplota termické modifikace od 20 °C do 160 °C) a následně statisticky velmi významná (160 °C–210 °C), o čemž svědčí i velmi rozdílné hodnoty obou křivek při postupném navyšování termické modifikace. Pozitivní vliv retardéru na dobu pro dosažení maximální rychlosti hoření je výraznější od termické modifikace od teploty 160 °C až do zvýšené teploty tepelné modifikace 210 °C, kdy jsou zároveň průměrné hodnoty sledované a zaznamenané v obrázku (obr. 15.) statisticky nevýznamné. I zde přetrvává pozitivní trend u vzorků ošetřených retardérem.



Obr. 16. Závislost doby k dosažení maximální rychlosti hoření (s) na tepelné modifikace (°C) u vzorků ošetřených retardérem hoření a bez použití retardérů hoření

6.3 Zařazení jednotlivých vzorků dřeva do příslušných stupňů hořlavosti

Průměrné hodnoty jednotlivých veličin hoření a jejich závislost na daných faktorech, které byly zmíněny a zohledněny v grafech na obrázcích 11–15, shrnuje tabulka 15.

Tab. 15. Hodnoty naměřené pro jednotlivé veličiny hoření s variačním koeficientem

Faktory		Veličina hoření				
Úprava dřeva retardéry hoření	Tepelná modifikace (°C)	Úbytek hmotnosti-600 s (%)	Rychlost hoření-600 s (%.s-1 x 10-5)	Maximální rychlost hoření (%.s-1)	DR (-)	Doba pro dosažení maximální rychlosti hoření
Bez retardérů hoření	20	4,72 (17,64)	5,40 (11,75)	42,18 (18,82)	0,32 (15,1)	188,0 (13,1)
	160	4,0 (13,5)	5,1 (14,2)	39,1 (11,2)	0,2 (16,5)	222,0 (19,2)
	180	4,5 (14,1)	8,4 (19,1)	50,2 (13,0)	0,4 (19,4)	165,6 (13,4)
	210	4,3 (18,8)	5,0 (17,8)	61,1 (18,5)	1,2 (16,3)	226,0 (19,0)
S retardéry hoření	20	12,9 (15,1)	9,8 (18,1)	58,4 (11,1)	1,9 (14,1)	100,0 (16,4)
	160	11,9 (13,7)	19,1 (10,8)	54,5 (11,1)	3,7 (16,1)	20,0 (11,2)
	180	12,0 (6,1)	15,5 (12,1)	49,3 (12,0)	2,9 (10,7)	22,0 (19,8)
	210	12,4 (11,6)	17,9 (14,6)	53,9 (8,4)	1,6 (17,1)	40,0 (15,4)

Pozn.: Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v procentech (%)

Základním kritériem pro zařazení jednotlivých, testovaných, dřevěných vzorků k odpovídajícím stupňům hořlavosti je úbytek hmotnosti. Sledované vzorky smrkového dřeva bez termické modifikace a bez aplikace retardéru byly podle tabulky (Tab. 14.) a dle průměrných hodnot ztráty hmotnosti při vystavení zdroji ohně a následnému hoření, zařazeny do skupiny B – tedy velmi těžko hořlavé (viz tab. 9. – Rozdělení do

stupňů hořlavosti dle ČSN 73 0810). Dřevěné vzorky s termickou úpravou a také bez aplikovaného retardéru bychom dle stejné tabulky, mohli zařadit do stejné skupiny, tedy do skupiny B – velmi těžko hořlavé (úbytek hmotnosti v % mezi 2,1 % a 5,0 % úbytkem hmotnosti).

Všechny vzorky tepelně upraveny byly shodně zařazeny do skupiny B – velmi těžko hořlavé. Nicméně jak je patrné z tabulky (Tab. 14.), tak se vzorky při aplikaci retardéru podle úbytku hmotnosti, zařadily do skupiny C2 – středně hořlavé. Což nám poukazuje na fakt, že nepotvrzujeme předpoklad VVÚD Praha (2005) o zařaditelnosti dřevěných vzorků do stupně hořlavosti B – velmi těžko hořlavé. Naopak se dle této tabulky, podle kritéria úbytku váhy, zařadily vzorky, na něž byl aplikován retardér na přírodní bázi, do stupně hořlavosti C2. Ani jeden ze sledovaných vzorků se dle průměrných hodnot ani nepřiblížil vrchní hranici pro zařazení do stupně hořlavosti B (spodní hranice 2,1 %, vrchní hranice 5,0%). I přes tento fakt dosahovaly vzorky v mnoha ohledech cíle, které jsme si stanovili. Například se při aplikaci retardéru na přírodní bázi snížila doba pro dosažení maximální rychlosti hoření. Tím pádem dosáhly vzorky ošetřené antipyrénem lepších výsledků než vzorky bez aplikovaného antipyrénu.

Nejmenšího úbytku hmotnosti dosáhly vzorky při termické modifikaci 160 °C, bez aplikovaného retardéru. Nejmenší úbytek hmotnosti a také nejrychlejší dobu pro dosažení maximální rychlosti hoření dosáhly vzorky s aplikovaným retardérem rovněž při tepelné modifikaci 160 °C. Nicméně i tak nemůžeme konstatovat zařazení do stupně hořlavosti B-velmi těžko hořlavé, ale naopak do již zmiňovaného stupně C2.

ZÁVĚR

Při termické modifikaci jsou patrné závěry, které shrnují následující odstavce.

Úbytek hmotnosti se použitím arabinogalaktánu projevil při termické modifikaci jako statisticky velmi významný. Z výsledků je vidět, že sledovaný faktor je díky modifikaci retardérem na přírodní bázi – arabinogalaktánem – velmi výrazný v porovnání se vzorky bez aplikovaného retardéru. Vliv retardéru se při termické modifikaci nejvíce projevil při teplotě 160 °C.

Rychlost hoření podle provedeného pozorování nebyla tolik ovlivněna použitím retardéru na přírodní bázi. Naměřené průměrné hodnoty u souboru vzorků byly na hraně statistické významnosti, a to pouze při termické modifikaci při teplotách 160 °C a 210 °C. Aplikací retardéru na přírodní bázi nebyla rychlost hoření ve vztahu k termické modifikaci prakticky ovlivněna.

Maximální rychlost hoření se při pozorování projevila jako statisticky nevýznamný faktor. Průběh tepelné modifikace obou souborů byl téměř totožný. Lze tedy konstatovat, že aplikace retardéru na přírodní bázi neměla na maximální rychlost vliv.

Poměr maximální rychlosti hoření byl modifikací arabinogalaktánu na hraně statistické významnosti. Tepelnou modifikací nejsou dřevěné vzorky s aplikovaným retardérem na přírodní bázi výrazně ovlivněny.

Doba k dosažení maximální rychlosti hoření pro soubor vzorků s modifikací retardérem na přírodní bázi - arabinogalaktánem - není z počátku statisticky významná. Až při tepelné modifikaci při teplotách 160 °C a 180 °C bylo pozorováno (viz obrázek č. 16), že se statisticky velmi významně projevila modifikace vzorků retardérem na přírodní bázi.

Celkově lze konstatovat, že největší vliv měl užitý retardér na přírodní bázi - arabinogalaktán - na soubor dřevěných vzorků při měření úbytku hmotnosti, kde byl vliv pozorován po celou dobu termické modifikace (600 s).

Vliv termické modifikace se oproti tomu u dalších faktorů nijak výrazně neprojevil.

Obecně probíhá testování vzorků jiných druhů dřevin po dobu 900 sekund, bez modifikace arabinogalaktánem. Nicméně v této práci bylo prokázáno, že použití

retardér na přírodní bázi má právě na toto velký vliv. Po uplynutí 600 sekund se na dřevěných vzorcích vytvořila zuhelnatělá vrstva, která zamezila přístupu kyslíku, a tím pádem byl plamen uhašen. Arabinogalaktán při svém použití, jako retardér proti hoření, sice, rychle začne hořet a je zde velmi výrazný úbytek hmotnosti, ale jeho největší přínos tkví v tom, že po uplynutí 600 sekund se vytvoří zuhelnatělá vrstva a tím je hoření uhašeno.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

ANONYMOUS. 2003. *ThermoWood Handbook*, Finnish Thermowood Association, c/o WoodFocus Oy. Helsinki, Finland, 2003. 66 str.

ASPINALL, G. O. *et al.* 1968, *Arabinogalactan afrom Japasese larch (Larix leptoleptis)*, J. Chem. Soc. C, 1968, 0, 2174. DOI: 10.1039/J39680002174.

BÍLKOVÁ, Z. 2013. *Vlastnosti, výskyt a metody stanovení nových typů zpomalovačů hoření v prostředí*. diplomová práce. Brno: Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, Centrum pro výzkum toxických látek v prostředí, 2013, 74 str.

BENGTSSON, C. - JERMER, J. - BREM, F. 2002. *Bending strength of heat-treated spruce and pine timber*. In: *International Research Group Wood Pre, Section 4-Processes*, No. IRG/WP 02-40242

BÖHM, M. - REISNER, J. - BOMBA, J. 2012. *Materiály na bázi dřeva* (Učební text). Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze. ISBN 978-80-213-2251-6, 2012, 181 str.

BUČAR, D., G. and MERHAR, M. (2015). *Impact and dynamic bending strength determination of Norway spruce by impact pendulum deceleration*, BioResources 10 (3), 4740-4750, DOI: 10.15376/biores.10. 3. 4740-4750.

BUČKO, J. and OSVALD A. 1998., *Rozklad dřeva teplem a ohňom*. 1. vyd., Zvolen: Technická Univerzita. 1998. 100 str. ISBN 978-80-228-0639-8.

CELÝ, O. 2009. *Dřevo jako výukový materiál*. Diplomová práce. Brno: Masarykova univerzita, 2009, 68 str.

ČÉKOVSKÁ, H. *et al.* 2017. *Fire Resistance of Thermally Modified Spruce Wood*. BioResources. 12. 947-959. 10.15376/biores.12.1.947-959

DEJMAL, A. 2009. *Sušení a modifikace dřeva* (Učební text). Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2009.

ESTEVEZ, B., M. – DOMINGOS, I., J. – PEREIRA, H., M. *Pine wood modification by heat treatment in air*. Bioresources 2008; 3:142.

GANDELOVÁ, L. - ŠLEZINGEROVÁ, J. - HORÁČEK, P. 2009. *Nauka o dřevě*. 3. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2009. 176 str. ISBN 978-80-7375-312-2.

GAO, M. *et al.* 2006. *Thermal degradation of wood treated with flame retardants*, J. Therm. Anal. Calorim. 85(3), 765-769. DOI: 10.1007/s10973-005-7 225-3.

-
- GAŠPARÍK, M. *et al.* 2017. *Flammability characteristics of thermally modified oak wood treated with a fire retardant*. *Bioresources*. 12. 8451-8467. 10.15376/biores.12.4.8451-8467.
- GRAY, P. and LEE, P., R. 1967. *Thermal explosion theory*. *Oxid Combustion Rev* 2. 183 str.
- HAGEN, M. *et al.* 2009. *Flammability assessment of fire-retarded Nordic spruce wood using thermogravimetric analyses and cone calorimetry*, *Fire Safety J.* 44(8), 1053-1066. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.07.004.
- HILL, C. 2006. *Wood Modification Chemical, Thermal, and Other Processes*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, UK. 2006. 260 str. ISBN 978-0-470-02172-9.
- HORÁČEK, P. 2008. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.* 2. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2008. ISBN 978-80-7375-169-2.
- JANSSENS, M. L. 1998 *Simple Model of the ISO 9705 Ignition Source*, IN Annual Conference on Fire Research, Gaithersburg, Maryland, NISTIR 5904, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 1996. pp. 84-88.
- KACIK F *et al.* 2013. *Effects of thermal treatment on chemical, mechanical and colour traits in Norway spruce wood*. *Bioresource Technology* 2013; 144:669. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.110
- KAČÍKOVÁ, D. – NETOPILOVÁ, M. - OSVALD, A. 2006. *Dřevo a jeho termická degradace*. 1. vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě. 2006. 79 str. ISBN 80-86634-78-7.
- KARINKANTA, P. 2015. *Dry fine grinding of Norway spruce (Picea abies) wood on impact-based fine grinding mills*. Dissertation thesis. Finland: University of Oulu Graduate School. 2015. 112 str. ISBN 978-952-62-0718-6
- KRAJČOVIČOVÁ, J. *et al.* 2009. *Hodnotenie materiálov a konštrukcií pre potreby protipožiarnej ochrany*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. 355 str. ISBN 978-80-228-2039-4.
- KUKLÍK, P. 2005. *Dřevěné konstrukce* (Učební text). 1.vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2005. 172 str. ISBN 80-01-03310-4.
-

-
- KUPILÍK, V. 2006, *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing. 2006. 272 str. ISBN 80-247-1329-2.
- KVARČÁK, M. 2005. *Základy požární ochrany*. 1.vyd. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě. 135 str. ISBN: 80-86634-76-0.
- MAKOVICKÝ, A. and OSVLADOVÁ, L. 2004. *Horenie smrekového dreva ovplyvnené retardáciou*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. 2004. ISBN 80-86634-66-3.
- MARNEY, D. C. O., et al. 2008. *Fire performance of wood (Pinus radiata) treated with fire retardants and a wood preservative*, Fire Mater. 32(6), 357–370. DOI: 10.1002/fam.973
- MATOVIČ, A. 1992. *Stavba dřeva*. 1. vyd. Brno:Vysoká škola zemědělská. 1992. 127str.
- NAVI, P. and SANDBERG, D. 2012. *Thermo-Hydro-Mechanical processing of wood*. 1.vyd. Lausanne: EPFL Press, 2012. 357 str. ISBN 978-2-940222-41-1.
- NOTHNAGEL, E., A. et al. 2000. *Cell and developmental biology of arabinogalactan-proteins*. 1. vyd. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 2000. 301 str. ISBN 978-0-306-46469-0.
- OSVALD, A. et al. 2009. *Hodnotenie materiálov a konštrukcií pre potreby protipožiarnej ochrany (Učebný text)*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2009. 355 str. ISBN 9788022820394 (brož.).
- OSVALDOVÁ, L. 2005. *Retardéry horenia*. IN *Arpos*. ISSN 1335-5910, 2000,18-19, str. 18-21.
- ÖSTMAN, B. et al. 2001. *Durability of fire retardant treated wood products at humid and exterior conditions review of literature*, Fire Mater. 25(3), 95-104. DOI: 10.1002/fam.758
- POTŮČEK, D. 2015. *Termicky modifikované dřevo-reakce na hoření*:bakalářská práce. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra základního zpracování dřeva. 2015. 53 str.

POTŮČEK, D. 2017. *Požární odolnost dřeva ošetřeného antipyriny*: diplomová práce Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra základního zpracování dřeva. 2017. 81 str.

POŽGAJ, A. *et al.* 1993, *Štruktúra avlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: PRÍRODA, 1993. 486 str. ISBN 80-07-00600-1.

PRIES, M., and MAI, C. 2013. *Fire resistance of wood treated with a cationic silica sol*, European Journal of Wood and Wood Products 71(2), 237-244. DOI: 10.1007/s00107-013-0674-7

REINPRECHT, L. 2008. *Ochrana dreva*. 1.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 453 str. ISBN 978-80-228-1863-6.

REINPRECHT, L. 2012. *Ochrana dreva*. 2. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2012. 453 str. ISBN 978-80-228-2351-7.

REINPRECHT, L. and VIDHOLDOVÁ, Z. 2003. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. 1. vyd. Zvolene: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 89 str. ISBN 978-80-228-1920-6.

SHAFIZADEH, F. 1984. *The chemistry of pyrolysis and combustion*. In: The chemistry of solid wood (Rowell, R. M. ed.) Advances in Chemistry. ISBN13: 9780841207967, 1984, roč. 207, kapitola 13, str. 489-529.

ŠLEZINGEROVÁ J. and GANDELOVÁ L. 2002. *Stavba dřeva*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. 2002. 187 str. ISBN 80-7157-636-0 (brož.).

TULACH, J. 2009. *Náhrada klasických šindelů materiálů z tepelně upraveného dřeva*, bakalářská práce. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta, Ústav nauky o dřevě. 2009. 39 str.

VAVARKA, J. *et al.* 2008, *Dřevostavby pro bydlení*. 1.vyd. Praha: Grada Publishing. 2008. 380 str. ISBN 978-80-247-2205-4.

VINAŘ, J. 1999, *Několik poznámek k historickým způsobům ochrany proti požáru*. IN *Sborník semináře „Protipožární ochrana památkových objektů“*. Praha: STOP. 1999.

VONDROVÁ, V. 2017. *Vybrané vlastnosti termicky modifikovaného dřeva*: diplomová práce. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra základního zpracování dřeva. 2017. 146 str.

VVÚD Praha. 2005. *Ochrana dřeva*. IN *Sborník přednášek*. Březnice 2005. Výrobní zkušební laboratoř Březnice, 2005.

WALKER, A. 2009. *Dřevo: velká encyklopedie: 150 druhů dřeva: podrobný průvodce "strom za stromem": svět nejvšestrannějšího přírodního zdroje*. 1. vyd. Praha: Grada, 2009. 192 str. ISBN 978-80-247-2858-2.

WANG, Q. *et al.* 2004. *Chemical mechanism of fire retardance of boric acid on wood*, Wood Sci. Technol. 38(5), 375-389. DOI: 10.1007/s00226-004-0246-4

WILLFÖR, S. *et al.* 1999, *Structural features of water-soluble arabinogalactans from Norway spruce and Scots pine heartwood*, Wood Science and Technology 36 (2002) 101–110 Springer-Verlag 2002 DOI 10.1007/s00226-001-0137.

ŽÁK, J. and REINPRECHT, L. 1998. *Ochrana dřeva ve stavbě*. 1. vyd. Praha: ARCH, 1998. 95 str. ISBN 80-86165-00-0.

Internetové zdroje

- ANONYMUS. 2017. *Hoření dřeva jeho ochrana proti ohni*. [online]. Praha: Dřevari Humlak [cit. 2017.08.18]. Dostupné z: http://drevari.humlak.cz/data_web/Data_skola/HUdrega/12.pdf.
- ANONYMUS. 2006. *Modřín arabinogalaktan: použití, nežádoucí účinky, interakce a varování* [online]. Praha [cit. 2017. 08. 24.]. Dostupné z: <http://samual.francodinez.com/modrin-arabinogalaktan-pouziti-nezadouci-ucinky-interakce-a-varovani/>.
- ARABINO GALAKTAN. 2003. *Arabinogalactan* [online]. Riga, Litva: Arabinogalaktan [cit. 2017.08.22.]. Dostupné z: <http://arabinogalactan.info>.
- DŘEVĚNÉ FASÁDA A TERASY Z MASIVU ThermoWood. 2015. *Terasové prkno ANTISLIP 26x140, zadní strana ryhovaná, THERMOWOOD*. [online] Opava: Dřevěná fasáda a terasy z masivu THERMOWOOD [cit. 2017.08.27]. Dostupné z: <https://fasady-terasy-thermowood.cz/drevena-terasova-prkna/98-terasovy-profil-antislip-26x140-zadni-strana-ryhovana#tab5>.
- HEJTMÁNEK, P. et al. 2016. *Vybrané požárně technické charakteristiky stavebních výrobků a hmot*. [online]. Praha: tzb-info.2016.1.25 [cit. 2017.08.02.]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/13649-vybrane-pozarne-technicke-charakteristiky-stavebnich-vyrobku-a-hmot>.
- KAFKOVÁ I. 2010. *Protipožární nátěry na ochranu dřevěných konstrukcí*. [online]. Ostrava: Konstrukce [cit. 2017.07.22.]. Dostupné z <http://www.konstrukce.cz/clanek/protipozarni-natery-na-ochranu-drevenych-konstrukci/>.
- KOCAEFE D. et al. 2007, *Mechanical behaviour of Québec wood species heat-treated using ThermoWood proces*, IN Holz als Roh- und Werkstoff [online]. Vol. 64, isme 4, pp 255-259 [cit. 2017. 09. 05.]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-007-0173-9>
- KOPOS Kolín a.s. 2017. *Rozdělení stavebních hmot z hlediska třídy reakce na oheň*, [online]. Kolín: Kopus [cit. 2017-08-18]. Dostupné z: <http://www.kopos.cz/cs/tridy-reakce-na-ohen>.
- KOZINOVÁ, L. 2017, *Aplikační návody protipožárních nátěrů* [online] STACHEMA CZ, s. r. o., Mělník. [cit. 2017. 08. 27.]. Dostupné z: <http://www.stachema.cz/files/files/Brozura-proti-pozarni-natery.pdf>.

-
- MILITZ, H. and TJEERDSMA, B. 2001. *Heat treatment of wood in Germany – state of the art. Thermotreatedwood* [online]. Hamburg: thermotreatedwood. [cit. 2017-03-03]. Dostupné z: <http://www.thermotreatedwood.com/Worldwide/Germany.pdf>.
- MOVYCHEM. 2017. *Protipožární ochrana* [online]. Hodonín: Movychem [cit. 2017. 08. 24.]. Dostupné z: <http://www.movychem.cz/protipozarni-ochrana>.
- NÁBYTKÁŘSKÝ INFORMAČNÍ SYSTÉM. 2013. *Požární odolnost dřeva*. In *Nábytkářský informační systém* [online]. Brno: NIS. [cit. 2017.08.18.]. Dostupné z <http://www.n-i-s.cz/cz/pozarni-odolnost-dreva/page/493/#>.
- OSVALD, A. 2009 *Drevo-požiarne spoľahlivý materiál*, [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media [cit. 2017.08.23.]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/drevo-poziarne-spolahlivy-material/>.
- PROKOM, 2013, *Výrobní proces ThermoWoodu, profily tepelné úpravy*. [online] Opava: Prokom [cit. 2017. 08. 27.]. Dostupné z: <http://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/128-drevene-profily-tepelne-upravene-specialni-technologie-thermowood>.
- RIGIPS a.s., 2017, *Katalog požárně odolných konstrukcí suché výstavby*. [online]. Praha: Rigips [cit. 2017. 07. 05.]. Dostupné z: https://www.rigips.cz/files/literaturaonline/katalog_pozarne_odolnych_konstrukci_201704/files/assets/basic-html/page-1.html.
- SOLAŘ, J. 2014. *Konstrukční ochrana dřevěných prvků*. [online]. Praha: tzb-info. [cit. 2017. 04. 03.]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/11686-konstrukcni-ochrana-drevenych-prvku>
- STACHEMA CZ s. r. o., *Flamgard Transparent*. [online]. Praha: Stachema. [cit. 2017. 08. 27.]. Dostupné z: <http://www.stachema.cz/produkty/protipozarni-natery-eva:c164/flamgard-transparent:p52.htm>.
- TIMBER FRAME DESIGN. 2014, *Jehličnaté dřeviny* [online]. Brno: Timber frame design [cit. 2017.08.22]. Dostupné na internetu: https://www.tfdesign.cz/index.php/konstrukce/drevo/jehlicnate_dreviny
- VAŠÁTKO, E. 2009. *Charakteristika protipožárních nátěrů na stavební nosné konstrukce*. [online]. Dvůr Králové nad Labem: J Seidl a spol., s.r.o. 2009–11–04 [cit. 2017-08-24]. Dostupné z: <http://www.seidl.cz/cz/pozarni-materialy-kam-se-cohodi/02->
-

drevene konstrukce/charakteristika-protipozarnich-nateru-na-stavebninosne-konstrukce-80.html>.

ZEIDLER, A and BÖHM, M. 2004. *Mikroskopický atlas dřevin* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, fakulta lesnická a dřevařská [cit. 2017.08.22.]. Dostupné z: http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/.

ZEJDA, J. et al. 2007. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva* [online]. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. [cit. 2017. 11. 06.]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz>.

Technické normy

ČSN EN 13501-1: 2003. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň.*

ČSN EN ISO 1182: 2010. *Zkoušení reakce výrobků na oheň – zkouška nehořlavosti.*

ČSN EN 13823: 2010. *Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu*

ČSN EN ISO 11925-2: 2011. *Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene.*

ČSN EN ISO 1716: 2010. *Zkoušení reakce výrobků na oheň – Stanovení spalného tepla (kalorické hodnoty).*

ČSN 64 0149: 1978. *Stanovení vznětlivosti materiálů.*

ČSN 73 0862: 1980. *Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot.*

ČSN 73 0853: 1978. *Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot.*

ČSN EN ISO 13943–73 0801: 2011. *Požární bezpečnost – Slovník.*

ČSN EN 13501-1 +A1 (730860): 2010. *Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1. Klasifikace podle výsledků zkoušek a reakce na oheň.*

PŘÍLOHY

Seznam příloh:

Příloha 1 - Tab. 16. Porovnání efektu individuálních faktorů používaných v Duncan Testu u sledovaných charakteristik

Příloha 1

Tab. 16. Porovnání efektu individuálních faktorů používaných v Duncan Testu u sledovaných charakteristik

Úbytek váhy - 600 s (%)		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
		4,71	12,91	3,97	1,92	4,47	12,03	4,31	12,42
1	20 °C		0,000	0,555	0,000	0,833	0,000	0,737	0,000
2	20 °C	0,000		0,000	0,432	0,000	0,466	0,000	0,669
3	160 °C	0,555	0,000		0,000	0,678	0,000	0,768	0,000
4	160 °C	0,000	0,432	0,000		0,000	0,927	0,000	0,679
1	180 °C	0,833	0,000	0,678	0,000		0,000	0,882	0,000
2	180 °C	0,000	0,466	0,000	0,927	0,000		0,000	0,726
3	210 °C	0,737	0,000	0,768	0,000	0,882	0,000		0,000
4	210 °C	0,000	0,669	0,000	0,679	0,000	0,726	0,000	
Rychlost hoření - 600 s (%. s ⁻¹ x 10 ⁻⁵)		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
		5,40	9,80	5,15	19,10	8,38	15,52	5,00	17,9
1	20 °C		0,237	0,936	0,001	0,394	0,010	0,914	0,002
2	20 °C	0,237		0,225	0,017	0,683	0,107	0,224	0,032
3	160 °C	0,936	0,225		0,001	0,380	0,009	0,973	0,002
4	160 °C	0,001	0,017	0,001		0,008	0,336	0,001	0,730
1	180 °C	0,394	0,683	0,380	0,008		0,057	0,380	0,015
2	180 °C	0,010	0,107	0,009	0,336	0,057		0,010	0,496
3	210 °C	0,914	0,224	0,973	0,001	0,380	0,010		0,002
4	210 °C	0,002	0,032	0,002	0,730	0,015	0,496	0,002	
Maximální rychlost hoření (%. s ⁻¹)		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
		42,18	58,3	39,1	54,5	50,2	49,3	61,0	53,8
1	20 °C		0,383	0,850	0,500	0,640	0,658	0,315	0,513
2	20 °C	0,383		0,306	0,811	0,648	0,621	0,868	0,793
3	160 °C	0,850	0,306		0,407	0,534	0,553	0,248	0,420
4	160 °C	0,500	0,811	0,407		0,804	0,772	0,704	0,967
1	180 °C	0,640	0,648	0,534	0,804		0,956	0,553	0,822
2	180 °C	0,658	0,621	0,553	0,772	0,956		0,528	0,793
3	210 °C	0,315	0,868	0,248	0,704	0,553	0,528		0,687

4	210 °C	0,513	0,793	0,420	0,967	0,822	0,793	0,687	
Poměr maximální rychlosti hoření (%)		(1) 0,32	(2) 1,89	(3) 0,20	(4) 3,74	(5) 0,35	(6) 2,93	(7) 1,23	(8) 1,55
1	20 °C		0,193	0,910	0,007	0,971	0,035	0,421	0,298
2	20 °C	0,193		0,168	0,109	0,194	0,334	0,561	0,744
3	160 °C	0,910	0,168		0,006	0,889	0,029	0,380	0,265
4	160 °C	0,007	0,109	0,006		0,007	0,453	0,040	0,066
1	180 °C	0,971	0,194	0,889	0,007		0,035	0,413	0,297
2	180 °C	0,035	0,334	0,029	0,453	0,035		0,152	0,225
3	210 °C	0,421	0,561	0,380	0,040	0,413	0,152		0,770
4	210 °C	0,298	0,744	0,265	0,066	0,297	0,225	0,770	
Doba k dosažení maximální rychlosti hoření (s)		(1) 188,0	(2) 100,0	(3) 222,0	(4) 20,00	(5) 165,60	(6) 22,00	(7) 226,00	(8) 40,00
1	20 °C		0,112	0,509	0,005	0,663	0,005	0,488	0,011
2	20 °C	0,112		0,034	0,161	0,207	0,158	0,032	0,248
3	160 °C	0,509	0,034		0,001	0,305	0,001	0,938	0,002
4	160 °C	0,005	0,161	0,001		0,014	0,969	0,001	0,715
1	180 °C	0,663	0,207	0,305	0,014		0,013	0,289	0,025
2	180 °C	0,005	0,158	0,001	0,969	0,013		0,001	0,726
3	210 °C	0,488	0,032	0,938	0,001	0,289	0,001		0,002
4	210 °C	0,011	0,248	0,002	0,715	0,025	0,726	0,002	