

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

Katedra základního zpracování dřeva

**PROTIPOŽÁRNÍ ODOLNOST ROSTLÉHO DŘEVA
A DŘEVA TEPELNĚ UPRAVENÉHO (THERMOWOODU)
OŠETŘENÉHO SYNTETICKÝM ANTIPYRÉNEM**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor: Jan Jindřich

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

2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Jindřich

Dřevařství

Název práce

Protipožární odolnost rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného syntetickým antipyrénem.

Název anglicky

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

Cíle práce

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

Metodika

1. Úvod

2. Analýza problematiky:

- vliv stupně termické modifikace na změny požárních vlastností různých druhů termicky modifikovaných dřevin,
- vliv aplikace syntetického antipyrenu na požární vlastnosti termicky modifikované dřevo.

3. Přínosy a doporučení

4. Závěr

Doporučený rozsah práce

60

Klíčová slova

požární charakteristiky, antipyrén, thermowood

Doporučené zdroje informací

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

Terzi, E. et al. 2011.: Fire performance and decay resistance of solid wood and plywood treated with quaternary ammonia compounds and common fire retardants

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

Ing. Hana Čékovská

Elektronicky schváleno dne 3. 5. 2016

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 23. 03. 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Protipožární odolnost rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného syntetickým antipyrénem; vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze, dne 13. dubna 2018

.....

Jan Jindřich

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. Za odborné vedení, trpělivost a cenné rady k mé bakalářské práci. Pak bych chtěl ještě poděkovat paní Ing. Lindě Makovické, PhD. za pomoc při vykonávání zkoušky na Fakultě bezpečnostního inženýrství Žilinské univerzity v Žilině.

V neposlední řadě chci poděkovat mým rodičům, kteří mi dali možnost studovat a dále i České zemědělské univerzitě v Praze za studijní podporu a výborné zázemí pro studium.

Abstrakt

Úkolem této práce je porovnat poznatky v oblasti protipožárních vlastností rostlého dřeva a dřeva tepelně modifikovaného jak s použitím antipyrénu tak bez něj. Zkouška, která byla provedena v rámci experimentální části, měla za cíl potvrdit neškodný vliv termické úpravy na protipožární vlastnosti dřeva a dále potvrdit nemalý vliv antipyrénů na ochranu dřeva proti ohni. Pro zkoušení protipožárních vlastností byl vybrán Padouk, tedy tropická dřevina původem z Afriky. Zkouška probíhala celkově na 40-ti vzorcích, z toho 20 při použití ochrany proti ohni a 20 bez ochrany. Každý z těchto dvou souborů byl rozdělen do 4 podsouborů podle teploty termické úpravy (20 °C, 160 °C, 180 °C, 210 °C). Proces odolnosti proti ohni se prováděl pomocí úbytku na hmotnosti vzorku v průběhu hoření. Zkouška probíhala na každém vzorku 10 min za přímého kontaktu s plamenem, přičemž byl zdroj plamene z každého prvního vzorku z jednotlivých stupňů termické úpravy po 10-ti minutách odtaven a dalších 5 minut se sledoval úbytek hmotnosti vzorku z důvodu degradace vlivem samovznícení, vzplanutí a následném žhavení dřeva. Vzorky byly o rozměrech 20 mm v tangenciálním směru, 100 mm v radiálním směru a 200 mm v příčném směru.

Z celého měření tedy vyplývá, že pouze na požární charakteristiku rychlost hoření nemá vliv termická modifikace a interakce retardéru a termické modifikace. V ostatních případech nasvědčují výsledky, zhotovené pomocí statické analýzy, že je potvrzena spojitost vlivu retardéru na rychlost hoření a termické modifikace, retardéru a interakce termické modifikace a retardéru na úbytek hmotnosti, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření a dobu k dosažení maximální rychlosti hoření.

Klíčová slova: protipožární ochrana, ThermoWood, Flamgard, retardéry hoření

Abstract

The aim of this work is to compare observations in the field of antifire properties of natural wood and thermally treated wood, both with antipyrene and without it. The test, which was performed within the framework of the experimental part, had the objective of confirming the harmless effect of thermal treatment on the antifire properties of wood and the considerable effect of antipyrenes on the protection of wood against fire. Padauk wood, which is a tropical wood originating from Africa, was selected for the testing of antifire properties. The test was performed on a total of 40 samples, 20 of which had antifire protection and 20 of which had no protection. Each of these sets of samples was further divided into 4 subsets according to the temperature of their thermal treatment (20 °C, 160 °C, 180 °C, 210 °C). Fire resistance was measured using the weight loss of the sample during the course of its combustion. The test was carried out on each sample for 10 minutes in direct contact with the flame. After 10 minutes, the source of the flame was put aside for every first sample of each of the subsets of thermal treatment, which was followed by 5 minutes of monitoring the sample's weight loss to assess its degradation due to self-combustion, ignition and the subsequent burning. The samples had the dimensions of 20 mm in the tangential direction, 100 mm in the radial direction and 200 mm the lateral direction.

The measurement shows that thermal modification and the interaction of retardant with the thermic modification has no effect on the burning rate. In other cases, the results achieved via a static analysis suggest that the test confirms the connection between the effect of retardant on the burning rate and thermal modification, the effect of retardant and the interaction between the thermal modification and retardant on weight loss, maximum burning rate, the ratio of maximum burning rate, and the time to reach the maximum burning rate.

Key words: fire protection, ThermoWood, Flamgard, flame retardants

Obsah

1 Úvod.....	13
2 Cíl práce	15
3 Analýza poznatků k předmětné problematice.....	16
3.1 Protipožární odolnost rostlého dřeva.....	16
3.1.1 Protipožární odolnost dřeva v konstrukci	16
3.1.1.1 Návrhové hodnoty pro protipožární odolnosti	17
3.1.1.2 Posouzení hloubky zuhelnatění	18
3.2 Tepelná modifikace dřeva a jeho vlastnosti	19
3.2.1 Výrobní proces termodřeva.....	19
3.2.1.1 ThermoWood.....	19
3.2.1.2 PLATO (Providing Lasting Advanced Timber Option).....	20
3.2.1.3 OHT proces (Oil Heat Treatment).....	21
3.2.1.4 Royal proces	21
3.2.1.5 Retifikační proces	21
3.2.2 Protipožární vlastnosti termicky modifikovaného dřeva	21
3.3 Charakteristiky aplikované na identifikaci hořlavosti materiálů.....	22
3.3.1 Proces hoření.....	22
3.3.2 Termická degradace	25
3.3.2.1 Termická degradace hemicelulózy	26
3.3.2.2 Termická degradace celulózy	26
3.3.2.3 Termická degradace ligninu	26
3.3.2.4 Vliv termické degradace na mikroskopickou stavbu dřeva.....	26
3.3.2.5 Vliv termické degradace na makroskopickou stavbu dřeva	27
3.3.3 Vlastnosti plamene.....	27
3.3.3.1 Druhy plamene	28
3.3.3.2 Teplota hoření.....	28
3.3.3.3 Rychlost šíření plamene	29
3.4 Antipyrény a jejich vliv na ochranu dřeva	30
3.4.1 Požadavky kladené na ochranu dřeva s použitím antipyrénů	31
3.4.2 Fyzikální účinky antipyrénů	32
3.4.2.1 Omezení přenosu hmoty.....	32
3.4.2.2 Omezení přenosu tepla	32
3.4.2.3 Ředění hořlavých plynů.....	34
3.4.3 Chemické účinky antipyrénů	34
3.4.4 Rozdělení antipyrénů podle původu	34
3.4.4.1 Ve vodě rozpustné anorganické ochranné látky	35

3.4.4.2	Organické látky	36
3.4.5	Způsoby aplikace antipyrénů	36
3.4.5.1	Povrchové ošetření dřeva antipyrénem	37
3.4.5.2	Hloubková impregnace dřeva antipyrény.....	37
4	Metody hodnocení hořlavosti materiálů	39
4.1	Hodnocení protipožární odolnosti dřeva	39
4.1.1	Testování podle norem EU	39
4.1.2	Reakce termicky modifikovaného smrkového dřeva na otevřený oheň	42
4.1.2.1	Materiály.....	43
4.1.2.2	Hodnocení a výpočty	44
4.1.2.3	Metoda	45
4.1.2.4	Výsledky a diskuze.....	46
4.2	Hodnocení protipožární odolnosti antipyrénů	49
5	Metodika práce.....	51
5.1	Metodika experimentální části	51
5.2	Zkušební vzorky	53
5.2.1	Příprava vzorků	53
5.2.2	Antipyréní úprava vzorků	54
5.3	Hodnocení a výpočet	55
6	Výsledky	56
6.1	Úbytek hmotnosti	56
6.2	Rychlost hoření.....	57
6.3	Maximální rychlost hoření	59
6.4	Poměr maximální rychlosti hoření	60
6.5	Doba k dosažení maximální rychlosti hoření	62
6.6	Charakteristiky hořlavosti	63
7	Výsledky a diskuze	65
8	Závěr.....	68
	Seznam použité literatury	69

Seznam tabulek

Tab. 1: Fáze termické degradace dřeva při různých teplotách	25
Tab. 2: Příklad teplot zdrojů plamene	28
Tab. 3: Rychlost hoření tuhých materiálů	29
Tab. 4: Třídy reakce na oheň stavebních výrobků kromě podlahových krytin	40
Tab. 5: Třídy reakce na oheň podlahových krytin	41
Tab. 6: Průměrné hodnoty sledovaných souborů zkušebních těles	44
Tab. 7: Výsledky měření 0-600 s	46
Tab. 8: Výsledky měření 600-900 s	47
Tab. 9: Procesy termické úpravy	54
Tab. 10: Hustota před a po termické modifikaci	54
Tab. 11: Podmínky nanášení ochranného prostředku	54
Tab. 12: Vliv jednotlivých faktorů na úbytek hmotnosti při hoření	57
Tab. 13: Srovnání vlivu materiálu na ztrátu hmotnosti za 600 s pomocí Duncanova testu	57
Tab. 14: Vliv jednotlivých faktorů na rychlost hoření	58
Tab. 15: Srovnání vlivu materiálu na rychlost hoření za 600 s pomocí Duncanova testu	59
Tab. 16: Vliv jednotlivých faktorů na maximální rychlost hoření	59
Tab. 17: Srovnání vlivu materiálu na rychlost hoření za 600 s pomocí Duncanova testu	60
Tab. 18: Vliv jednotlivých faktorů na poměr maximální rychlosti hoření	61
Tab. 19: Srovnání vlivu materiálu na poměr maximální rychlost hoření pomocí Duncanova testu	62
Tab. 20: Vliv jednotlivých faktorů na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření	62
Tab. 21: Srovnání vlivu materiálu na dobu k dosažení maximální rychlost hoření pomocí Duncanova testu	63
Tab. 22: Průměrné hodnoty charakteristik hořlavosti	64

Seznam obrázků

Obr. 1: Výrobní proces ThermoWood	20
Obr. 2: Schéma materiálových a energetických bilancí při hoření a fotosyntéze	22
Obr. 3: Faradayův trojúhelník hoření.....	24
Obr. 4: Rotační model hoření.....	24
Obr. 5: Dřevěný průřez vystavený účinkům požáru	27
Obr. 6: Rychlost odhořívání dřeva při konstantní teplotě 800 °C.....	30
Obr. 7: Vzorčky podle stupně termické úpravy	43
Obr. 8: Rozměry zkušebního vzorku	43
Obr. 9: Potřebná zařízení pro měření	46
Obr. 10: Graf úbytku na hmotnosti při hoření za čas 0-600 s	47
Obr. 11: Graf úbytku na hmotnosti při hoření za čas 600-900 s	48
Obr. 12: Rychlost odhořívání v čase 0-900 s	48
Obr. 13: Rychlost odhořívání v čase 600-900 s	49
Obr. 14: Měření úbytku hmotnosti při hoření na vzorcích bez protipožárního nátěru.....	52
Obr. 15: Měření úbytku hmotnosti při hoření na vzorcích s protipožárním nátěrem.....	52
Obr. 16: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na úbytek hmotnosti při hoření za 600 s	56
Obr. 17: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na rychlost hoření za 600 s.....	58
Obr. 18: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na maximální rychlost hoření.....	60
Obr. 19: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na poměr maximální rychlosti hoření	61
Obr. 20: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření	63

Seznam zkratk a značek

FIGRA	–	index rychlosti růstu ohně ($W \cdot s^{-1}$)
Fs	–	šíření plamene (EN 13501-1) (mm)
PSC	–	spalné teplo ($MJ \cdot kg^{-1}$)
THR_{600s}	–	celkové uvolněné teplo ze vzorku za čas $300 \text{ s} \leq t \leq 900 \text{ s}$ (MJ)
Δm	–	rozdíl hmotnosti
ΔT	–	rozdíl teplot

1 Úvod

Jen málokterý materiál, jako je dřevo, doprovází celou historii lidských dějin, a ještě po velice dlouhou dobu ji doprovázet bude. Dřevo tvoří stále jeden z nejvíce používaných konstrukčních materiálů, a i když je v moderní době tendence přírodní materiály nahrazovat materiály uměle vytvořenými, dřevo stále má nezastupitelné místo nejen v budování nových stavebních projektů, ale také k výrobě nábytku, stavebně truhlářských výrobků, sportovních potřeb, obalů, hudebních nástrojů či drobných předmětů v domácnosti a hraček.

Mezi největšími výhodami dřeva, které mu dávají přední místo v celkovém hodnocení materiálů, patří dobrá opracovatelnost, obnovitelnost zdrojů, výborný poměr pevnost k hmotnosti prvku, snadná dostupnost, příjemné estetické vlastnosti, odolnost proti korozi nebo snadná spojitelnost s ostatními materiály. Ale žádný materiál nemá jen pozitivní vlastnosti a dřevo není výjimkou. Ať se už jedná o různorodou strukturu dřeva, rozdílné vlastnosti dřeva jiných směrů, sesychání a bobtnání, chyby ve dřevě, malá odolnost vůči biotickým škůdcům nebo snadná zápalnost a hoření dřeva, je potřeba s těmito vlastnostmi počítat a předcházet jim vhodnými opatřeními.

Právě poslední zmiňovaná negativní vlastnost, snadná zápalnost a hoření dřeva, nás bude zajímat. Porozumět problematice dané věci nám dává možnost navrhnout řešení a ovlivňovat vlastnosti dřeva k lepšímu. V tomto případě nás tedy zajímá, jak snížit zápalnost dřeva a zpomalit proces hoření. Tato otázka je jistě jedna z nejvíce pokládaných otázek v případě ovlivňování vlastností dřeva a je ještě zcela aktuální. Využití dřeva ve stavebnictví se už dávno nevztahuje jen na chaty a malé domky, ale v současnosti, s potřebou zvýšení ekologie budov, se dřevo jako hlavní materiál využívá i na vícepodlažní budovy a rozsáhlé velkoplošné stavby. S požadavkem na velkou kapacitu dřevěných budov roste i požadavek na nadprůměrné protipožární vlastnosti a odolnost prvků proti ohni. Tyto požadavky se budou neustále zvyšovat, a proto je velice důležité porozumět této problematice a pomocí již podložených znalostí z dřívějších či nových výzkumů předcházet, mnohdy tragickým nehodám v důsledku požáru. Právě oběti materiální, ale zejména lidské, se staly hlavním podmětem ke zkoumání vlastnosti odolnosti dřeva proti ohni. V důsledku toho se vývoj v posledních letech značně urychlil a v dnešní době již známe celou řadu ochranných

prostředků proti ohni, které sice zcela neochrání daný dřevěný prvek, ale značně zpomalí proces hoření a v případě malého zdroje ohně, může i zcela zamezit rozvoji požáru.

Otázka protipožární odolnosti dřeva se v této práci nevěnuje jen dřevu rostlému, ale u dřeva tepelně modifikovanému, které je v současnosti velice oblíbené a používané v prvcích nejen dřevěných staveb. Je to díky potlačení některých negativních vlastností (malá odolnost proti biotickým škůdcům a povětrnostním podmínkám), při dostatečném zachování vlastností pozitivních. A právě o protipožární odolnosti rostlého dřeva a dřeva termicky modifikovaného (Thermowoodu) s použitím syntetického nátěru určeného na ochranu dřeva proti ohni (antipyrenu) a jejich vzájemnému porovnání, se budu věnovat.

V této práci je mým cílem shrnout poznatky o procesu hoření, rozebrat problematiku požáru a zejména zdůraznit potřebu neustálého vývoje v problematice požáru dřevěných staveb.

2 Cíl práce

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

K naplnění stanoveného cíle je nutno analyzovat literární poznatky o požárních charakteristikách používaných k identifikaci vlastností materiálů a také poznatky o vlivu tepelného působení na rostlé dřevo a dřevo tepelně modifikované.

V posledním kroku získat poznatky o syntetických retardérech hoření, jejich vývoji a trendy v jejich používání a rozšíření známých poznatků získaných vlastním experimentálním výzkumem prováděným na termicky modifikovaném dřevě upraveném syntetickým retardérem, které bylo porovnáno s referenčními vzorky bez aplikace retardéru.

3 Analýza poznatků k předmětné problematice

3.1 Protipožární odolnost rostlého dřeva

Dřevo je velice univerzální materiál, pro který nacházíme široké uplatnění. Ať už se jedná o stavby, nábytek, drobné předměty v domácnosti či hudební nástroje, dřevo plní nezastupitelnou roli po celé dějiny lidstva.

To, co dělá ze dřeva jeden z nejvíce používaných materiálů je jeho dostupnost, obnovitelnost, dobrá zpracovatelnost a dostatečně velké znalosti o jeho fyzikálních a mechanických vlastnostech. Právě díky dobré znalosti tohoto materiálu má dřevo tak mnohostranné využití. Proto lze při správném použití aplikovat dřevo a jeho modifikace na místa, kde by to bylo v minulosti nemyslitelné.

Dřevo, jako každý materiál, má své výhodné a nevýhodné vlastnosti. Potlačit negativní vlastnosti dřeva a podpořit ty pozitivní je dnes důležitým prvkem vývoje dřevěných materiálů. Pokud je dřevo zpracováno a není určeno jako palivo, nastává jako jedna z největších nevýhod hoření dřeva. V posledních letech se věnovalo značné úsilí do navýšení protipožární odolnosti dřeva, aby mohlo být použito v širším měřítku na dřevěné stavby a konstrukce.

3.1.1 Protipožární odolnost dřeva v konstrukci

To, jak se chovají dřevěné prvky dřeva v konstrukci, záleží na mnoha faktorech a odlišujeme chování plně rozvinutého požáru a chování při rozhořívání. Jako určující faktory při rozhořívání lze považovat hořlavost materiálů, stupeň jeho zápalnosti, rychlost šíření ohně/plamene a míra předávání tepla. Fáze, kdy jsou všechny hořlavé materiály zachváceny ohněm, se nazývá plně rozvinutý požár a schopnost odolávat plně rozvinutému požáru se označuje požární odolnost. Schopnost odolávat požáru se vztahuje ke konstrukčnímu prvku, a ne k materiálu (Kuklík, Kuklíková, 2010).

Hodnotíme-li požární odolnost dřeva, rozdělujeme ji na hořlavost dřeva a požární odolnost konstrukce. Hořlavost dřeva je důležitá na začátku požáru a lze ji do jisté míry snižovat použitím antipyrénů. O hořlavosti dřeva je více pojednáváno v kapitole 3.3.

Požární odolnost vyjadřuje čas, po který konstrukce či prvek odolává ohni. Čas je vyjádřený v minutách a dřevo si po tuto dobu musí zachovat svoji celistvost, stabilitu a plnit funkci izolace. Požární odolnost celé konstrukce je kromě odolnosti dřeva dána i odolností jednotlivých prvků a skladbou materiálů. Při srovnání dřevěných nosníků s prvky z ocele, hliníku a betonu, mají dřevěné nosníky vyšší požární odolnost. Je to dáno velmi nízkou tepelnou vodivostí a při zvýšené teplotě mění své rozměry jen minimálně (Svatoň, 2000).

Nosnost je schopnost prvku konstrukce odolávat požáru po určitý čas. Požár působí na jednu nebo více stran prvku při mechanickém namáhání při čemž by se neměla snížit konstrukční pevnost. Hodnocení nosnosti prvku je dáno jeho druhem. Stropy a střechy, které jsou namáhány ohybem, se hodnotí rychlostí průhybu a průhybem. Prvky zatížené osově, jako sloupy a stěny, je hodnocena rychlost kontrakce a kontrakce.

Celistvost je schopnost dělicího prvku konstrukce odolávat požáru jen z jedné strany bez přenosu požáru na nenamáhanou stranu prvku průnikem plamenů nebo hořících plynů. Ty mohou mít za následek vznícení povrchu, který není namáhaný nebo vznícení hořlavých materiálů v blízkosti hořícího prvku.

Celistvost se hodnotí při třech stavech porušení kritérií celistvosti:

- trhliny a otvory přesahující určité meze,
- vznícení bavlněného polštáře,
- trvalé hoření plamene na nenamáhané straně.

Izolace je schopnost prvku konstrukce odolávat požáru, který působí jen z jedné strany prvku, a to bez šíření požáru na nenamáhanou stranu prvku důsledkem významného přestupu tepla. Nenamáhaná strana ani jakýkoliv jiný prvek v blízkosti by se neměl vznítit vlivem přestupu tepla a prvek by měl poskytovat i dostatečnou ochranu před šířícím se teplem pro prvky ostatní i pro lidi v jeho blízkosti (Osvald, Štefko, 2013).

3.1.1.1 Návrhové hodnoty pro protipožární odolnosti

Mechanická odolnost prvků vystavených účinkům požáru se určuje ze vztahů (1) a (2).

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (1)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2)$$

Kde	$f_{d,fi}$	je návrhová pevnost při požáru,
	$S_{d,fi}$	návrhová tuhostní vlastnost při požáru,
	f_{20}	20 % kvantil pevnostní vlastnosti při běžné teplotě,
	S_{20}	20 % kvantil tuhostní vlastnosti při běžné teplotě,
	$k_{mod,fi}$	modifikační součinitel pro požár,
	$\gamma_{M,fi}$	dílčí součinitel spolehlivosti při požáru.

Modifikační součinitel pro požár $k_{mod,fi}$ zohledňuje redukci pevnostních a tuhostních vlastností za zvýšené teploty a nahrazuje modifikační součinitel pro navrhování při běžné teplotě k_{mod} . Hodnota dílčího součinitele spolehlivosti při požáru je doporučena $\gamma_{M,fi} = 1$ (Kuklík, Kuklíková, 2010).

3.1.1.2 Posouzení hloubky zuhelnatění

Hloubka zuhelnatění určuje odolnost prvků ze dřeva proti požáru. Hloubka zuhelnatění je určena vzdáleností mezi vnějším povrchem původního prvku a polohou čáry zuhelnatění. Určuje se z doby vystavení účinkům požáru a příslušné rychlosti zuhelnatění. Hloubka zuhelnatění se posuzuje z průřezu prvku vystaveného účinky požáru.

Rychlost zuhelnatění vrstvy jsou běžně rozdílné pro:

- povrchy nechráněné během doby vystavení účinkům požáru,
- povrchy chráněné, u kterých k zuhelnatění dochází ještě před porušením pláště požární ochrany,
- povrchy chráněné, které jsou vystaveny účinkům požáru až po porušení pláště požární ochrany.

Jelikož je tepelná vodivost zuhelnatělé vrstvy asi jedna šestina tepelné vodivosti rostlého dřeva, působí zuhelnatělá vrstva jak vrstva chránící nepoškozené dřevo před dalším šířením požáru. Rozklad dřeva pod zuhelnatělou vrstvou je zpomalen a teplota

uprostřed průřezu je mnohem nižší než na povrchu. Z toho lze konstatovat, že požární odolnost dřevěných konstrukcí je mnohem vyšší, než se všeobecně předpokládá (Kuklík, Kuklíková, 2010).

3.2 Tepelná modifikace dřeva a jeho vlastnosti

Tepelná modifikace dřeva je proces úpravy dřeva, kdy záměrně zvýšíme jeho teplotu, abychom zlepšili jeho vlastnosti vůči biologickým škůdcům a vodě. Při zvýšené teplotě v rozmezí 180 °C až 280 °C v časovém úseku 15 minut až 24 hodin, nastávají nejvíce znatelné změny ve struktuře dřeva, které se odráží na jeho vlastnosti. Jsou to zejména – pevnost, biodolnost, hygroskopicita a rozměrová stabilita. Faktory, které ovlivňují míru a rozsáhlost změn mohou být dány podmínkami prostředí nebo také vstupní vlhkostí dřeva. Pod podmínkami prostředí si lze představit prostředí v oxidační atmosféře nebo prostředí bez přítomnosti vzduchu. Díky tvorbě esterových a dalších chemických vazeb v lignin-sacharidové matici dřeva už při teplotách 110 °C se stává dřevo rozměrově stabilnější (Reinprecht, 2008).

Obecně lze říci, že s vyšší teplotou úpravy dřeva se zvyšuje i jeho ochrana. To má ale za následek nižší pevnost dřeva. Proto je důležité zvolit takovou teplotu, při které se zachová co nejvyšší pevnost, ale dřevu zůstane i vysoká odolnost (Novák, 2011).

3.2.1 Výrobní proces termodřeva

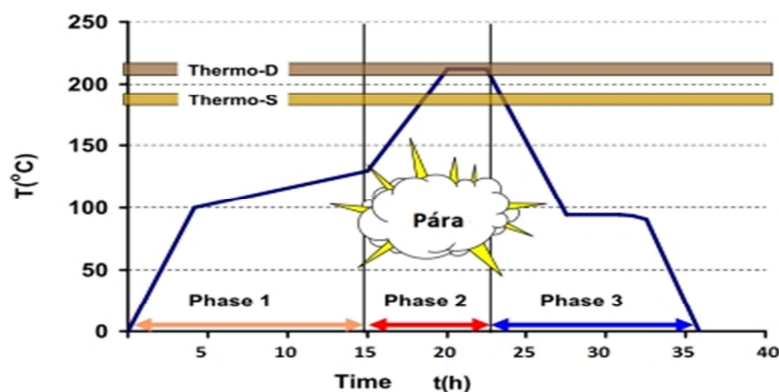
Termodřevo lze vyrobit několika technologiemi. Následující procesy výroby se používají zejména v Evropě. Jedná se zejména o procesy ThermoWood, PLATO, OHT, Royal a proces retifikační.

3.2.1.1 *ThermoWood*

Proces výroby je rozdělen na 3 etapy.

Zvýšení teploty a sušení. Prvním krokem ve výrobě TermoWoodu je prudké zvýšení teploty dřeva v sušárně na 100 °C. Následuje pozvolné zvyšování teploty na 130 °C,

kdy by mělo dřevo dosahovat nulové vlhkosti. K sušení se největší míře používá pára nebo horký vzduch.



Obr. 1: Výrobní proces ThermoWood

Zdroj: (www.prokom.cz)

Tepelná úprava. V následující etapě se se zvýší teplota a během 2-3 hodin se dřevo ponechá při 185–230 °C. Přesnější čas a teplota nám určují třídu termodřeva (Thermo-S a Thermo D) (viz obr. 1).

Chlazení a úprava vlhkosti. Při poslední etapě se upravené dřevo ochlazuje na teplotu 80-90 °C a zvlhčuje na hodnotu 4-7 % vlhkosti dřeva (Reinprecht, 2008).

3.2.1.2 PLATO (*Providing Lasting Advanced Timber Option*)

Technologie PLATO se skládá ze 4 procesů. Každý z procesů se od vedlejších liší změnou tlaku, teploty či doby trvání. Tyto parametry jsou dány druhem dřeva, jeho tloušťkou a tvarem.

Hydrotermolýza. Při zvýšení tlaku na 0,6 až 1 MPa a teploty na 150 až 190 °C se dřevo hydrotermicky upraví pomocí páry nebo horkého vzduchu. Celkový čas tohoto procesu je 4 až 5 hodin.

Sušení. Dále je nutné dřevo vysušit na vlhkost 8 až 10 %. Proces může trvat 3 až 5 dní.

Vytvrzování. Vytvrzování dřeva se děje po dobu 12 až 16 hodin při teplotě 150 až 190 °C a tlaku 0,1 MPa. Při tomto procesu se zamezuje přístupu vzduchu a vlhkost se dostává na hodnotu pod 1 %.

Kondicionování. Jako poslední proces výroby je opětovné zvlhčení dřeva v sušárně na vlhkost 4 až 6 % v délce 3 dnů (Reinprecht, 2008).

3.2.1.3 OHT proces (Oil Heat Treatment)

Termická úprava dřeva při použití procesu OHT se provádí v impregnačním kotli, v kterém se nachází rostlinný olej (nejčastěji lněný) o teplotě 200 až 220 °C. Olej postupně vniká do dřeva a ohřívá ho. Cílem je udržet teplotu ve středu materiálu na 180 až 200 °C po dobu 2 až 4 hodin. Na závěr probíhá ochlazování dřeva, čímž se rozměrově ustálí (Reinprecht, 2008).

3.2.1.4 Royal proces

V dnešní době nejméně používaná metoda tepelné modifikace dřeva probíhá při nízké teplotě 60 až 90 °C za sníženého tlaku v impregnačním kotli s olejem. Olej však nevniká do buňkových stěn dřeva a po ukončení procesu se odsává při vakuu (Reinprecht, 2008).

3.2.1.5 Retifikační proces

Před retifikačním procesem je nutné dřevo nejprve vysušit na vlhkost 12 %. V interním prostředí dusíku se dřevo zahřívá na teplotu 210 až 260 °C. Při této teplotě dřevo mírně pyrolyzuje a termooxidační děje probíhají jen v nižší míře, díky čemuž se do jisté míry zachovává jeho původní pevnost (Reinprecht, 2008).

3.2.2 Protipožární vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

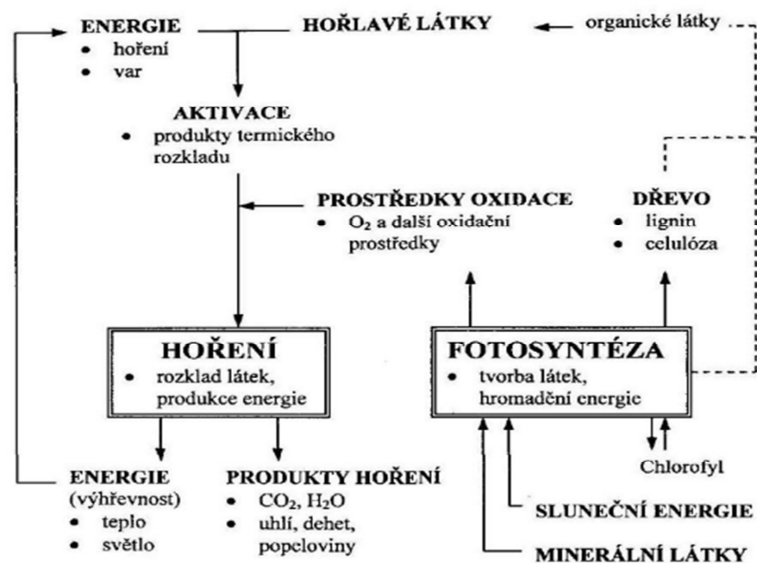
Protipožární vlastnosti termodřeva se v úzkém rozsahu shodují s protipožárními vlastnostmi dřeva termicky neupraveného. Výjimku tvoří dřevo upravené procesem OHT, kdy se při zvýšeném obsahu oleje ve dřevu může snížit protipožární odolnost dřeva. (Reinprecht, 2008).

3.3 Charakteristiky aplikované na identifikaci hořlavosti materiálů

Průběh hoření dřeva je dán jeho fyzikálními vlastnostmi. Tyto vlastnosti jsou prvořadě pro charakteristiky hořlavosti dřeva. Patří mezi ně zejména zápalnost, způsob šíření plamene, rychlost hoření, teplota hoření a další charakteristiky jako žhavení a doutnání. To, co určuje parametry hoření je do jisté míry je anatomická stavba dřeva, tedy jeho hustota a chemické složení (Svatoň, 2000).

3.3.1 Proces hoření

Dřevo je biopolymerní materiál a obsahuje vysoké množství energie. Nastalo tak vlivem endotermických reakcí (přeměna glukózy na polysacharidy a lignín) a následkem fotosyntézy (tvorba glukózy z oxidu uhličitého a vody). Vlivem tepelných aktivací (plamen, sálavé teplo a jiné) se energie může zpětně uvolnit. Zpětné uvolnění energie znamená, že základní stavební prvky dřeva (celulóza, hemicelulóza, lignin) se štěpí a vytváří hořlavé plyny. Pokud nastane dostatečně vysoká teplota, vytvořené hořlavé plyny reagují s kyslíkem, vznikají oxidy uhlíku, voda a uvolňuje se velké množství energie, které se působí na ohřev a pyrolýzu dřeva. Při teplotách okolo 250 °C se hořlavé plyny dokáží zapálit a nastává samovolné hoření dřeva. Dřevo dále již nepotřebuje vnější zdroj tepla (Osvald, Štefko, 2013).



Obr. 2: Schéma materiálových a energetických bilancí při hoření a fotosyntéze

Zdroj: (Netopilová, 1996)

Hoření lze tedy shrnout jako chemickou reakci, při které dochází k uvolňování tepla a světelnému záření. Většinou se jedná o oxidační reakci, jejímž projevem vzniká plamen. Jsou dva typy plamene – studený a horký. Zatímco studený plamen je spojen se středním stupněm oxidačních reakcí, horký plamen doprovází stupně konečné. Při požáru se uvažuje s přítomností horkého plamene (Štroch, 2010).

Hoření se rozděluje na tři fáze:

- iniciace – vzplanutí. Jedná se o počáteční fázi vzplanutí. Překročí-li dřevo teplotu 275 °C, již nepotřebuje zdroj hoření a hoří samo – jedná se o exotermickou reakci,
- propagace – plamen se šíří a dochází k rozkladu dřeva,
- terminace – nastává žhnutí dřeva. V této fázi hoří dřevo bez plamene a dochází k útlumu hoření.

Podle teploty působení lze určit chemické změny, které mají vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti:

- do 150 °C – nastává pouze odpařování vody,
- 150 °C – dochází k pomalému rozkladu dřeva. Při této teplotě se nevratně mění struktura dřeva,
- 180 °C–210 °C – dřevo se intenzivněji rozkládá a vytváří prchavé produkty a hořlavé plyny,
- 270 °C–280 °C – dřevo již nepotřebuje zdroj ohřevu, rozklad je intenzivní.

Při teplotách nad 150 °C nastává kromě rozkladu dřeva i barevná změna, která s vyšší teplotou zintenzivňuje (Jiří Holan, 2006).

Důležitou podmínkou hoření je stabilita, kterou popisuje Faradayovův trojúhelník hoření (obr. 3). Skládá se ze tří částí, bez kterých nemůže dojít k hoření:

- přítomnost hořlavé látky,
- přítomnost oxidačního prostředku,
- přítomnost iniciačního zdroje.

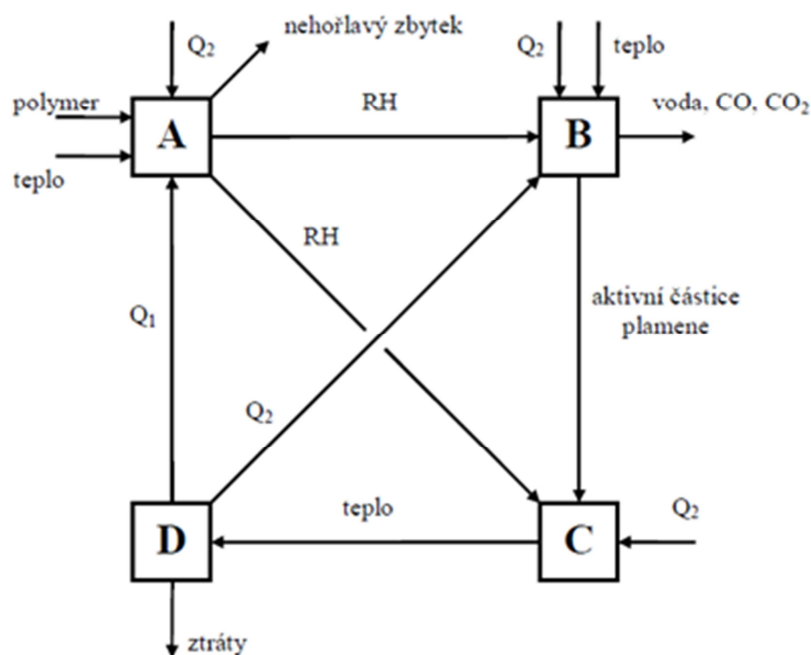


Obr. 3: Faradayův trojúhelník hoření

Zdroj: (www.tzb-info.cz)

Z Faradayova trojúhelníku hoření byl odvozen tzv. rotační model hoření (obr. 4). Je v něm popsáno vzájemné provázání průběhu děje hoření:

- rozklad polysacharidu a ligninu na prachové produkty,
- tvorba tepelného a světelného záření spolu s přeměnou hořlavých produktů na reaktivní částice plamene,
- rozdělení tepla k povrchu makromolekulární látky a do okolí.



Obr. 4: Rotační model hoření

Zdroj: (Reinprecht, 2001)

Proces začíná vstupem tepla z vnějšího zdroje a polymeru do místa A. Dochází k termooxidačnímu rozkladu s uvolněním tepla a následně z materiálu vzniká plynné palivo (RH) a plynné nebo pevné nehořlavé produkty. Palivo (RH) se v místě B vlivem kyslíku a tepla formuje na aktivní částice plamene a vznikají další nehořlavé produkty jako CO₂ a voda. V místě C vzniká velké množství tepla, které za podpory paliva (RH) a snížené o ztráty se v místě D rozděluje do míst A a B. Je potřeba aby tepelné toky Q₁ a Q₂ nabyli takové hodnoty, aby rychlost rotace cyklů ABCDA a BCBD byly synchronizované a přijatelně velké. Jedině tak může dojít k hoření bez vnějšího zdroje tepla (Reinprecht, 2001).

3.3.2 Termická degradace

Termický rozklad dřeva začíná přívodem tepelné energie, která má za následek chemickou reakci. Tepelná energie stimuluje elektrony kovalentních vazeb v polysacharidech a ligninu do stavu s vyšší energetickou hladinou. Reakce se uskutečňují až od rozmezí teplot 66 až 110 °C. Pod tuto hladinu nejsou reakce pravděpodobné. Při teplotě nad 150 °C dochází k jasnějšímu rozkladu stavebních složek dřeva, přičemž nejdříve nastává narušení hemicelulózy, následně celulózy a nakonec ligninu (Osvald, Štefko, 2013). Tab. 1 nastiňuje rozdílnost odolnosti jednotlivých složek dřeva a rozděluje proces hoření na několik fází s různými druhy rozkladu a produktu termického rozkladu.

Tab. 1: Fáze termické degradace dřeva při různých teplotách

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

Zdroj: (Reinprecht, 2001)

3.3.2.1 Termická degradace hemicelulózy

Hemicelulóza je složkou dřeva, která je nejméně stabilní. Její rozklad nastává v rozmezí teplot 170-240 °C. Výrazný exotermický efekt nastává nad teplotou 200 °C (Reinprecht, 2008).

3.3.2.2 Termická degradace celulózy

Oproti hemicelulóze je degradace celulózy více stabilní a do teploty 250 °C je velice mírná. Až při teplotě nad 315 °C se vazby v základním řetězci naruší a nastává výrazná depolymerizace. Narušení vazeb se děje podle radikálového mechanismu, kdy se koncový článek celulózy mění na levoglukózan a následně se přemění na hořlavé plyny (Reinprecht, 2008).

3.3.2.3 Termická degradace ligninu

Lignin je ze základních složek dřeva nejstabilnější díky trojrozměrné benzenoidní sktruktuře, která velmi dobře odolává tepelnému působení. Při teplotě 100-180 °C se nejprve lignin plastifikuje. Tato fáze se nazývá endotermická. Až při teplotách v rozmezí 300-400 °C nastává výraznější exotermický rozklad (Reinprecht, 2008).

3.3.2.4 Vliv termické degradace na mikroskopickou stavbu dřeva

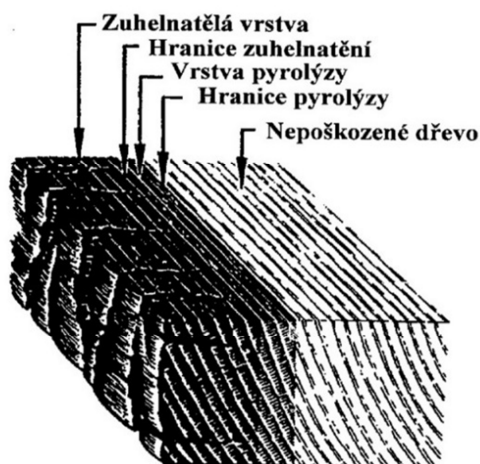
Studie z elektronového mikroskopu potvrzují vliv anatomické stavby dřeva na proces hoření. Jedná se hlavně o jeho první fázi – zapálení. Určujícím faktorem je v první řadě chemické složení a geometrický tvar buněčných elementů.

Po termické degradaci nastává hlavně ztenčení buněčné stěny. To je způsobené zejména degradací hemicelulózy a celulózy v sekundární vrstvě buněčné stěny. Nejodolnější je lignifikovaná střední lamela a primární stěna, která si i po tepelné degradaci zanechává svůj tvar, a to dokonce i chvíli před zpopelněním (Osvald, Štefko, 2013).

3.3.2.5 Vliv termické degradace na makroskopickou stavbu dřeva

Při termické degradaci jsou v první fázi pozorované zejména trhliny. Tvorba trhlin se děje při velmi vysokých teplotách za velmi krátký čas nebo při teplotách nedosahujících vysokých hodnot. S vyšší mírou degradace se trhliny zvětšují a děj hoření se zintenzivňuje.

Tepelná degradace má za následek změnu barvy. Barva se mění v závislosti na rychlosti a teplotě ohřevu. Od světlé barvy postupuje intenzita zabarvení přes hnědou až černou, která označuje zuhelnatění dřeva. Zuhelnatělá vrstva dřeva je dána odbouráváním polysacharidového podílu složek a je to ve všech případech konečná fáze hoření. Tato vrstva má autoretardační vlastnost, tudíž je špatným šířitelem tepla. Zuhelnatělá vrstva se nachází po celém povrchu degradovaného dřeva. Není homogenní, ale skládá se z několika vrstev a vzniká při jiné teplotě s jinou kvalitou (Osvald, Štefko, 2013).



Obr. 5: Dřevěný průřez vystavený účinkům požáru

Zdroj: (www.konstrukce.cz)

3.3.3 Vlastnosti plamene

Plamen je objem plynu, ve kterém probíhá proces jejich hoření. Vzniká u homogenního hoření, což je hoření, kdy je oxidovadlo a hořlavina v plynné fázi. Látky v plynném skupenství se navzájem směšují a vytváří hořlavý celek. Homogennímu hoření se díky jeho projevu plamenem říká také plamenné hoření.

Druhým druhem hoření je hoření heterogenní. To vzniká hořením pevné hořlaviny s plynným kyslíkem. Děj probíhá na povrchu hořlaviny a charakterizuje jej žhnutí a nepřítomnost plamene.

Dále rozeznáváme oblasti hoření, a to difuzní a kinetickou. Difuzní oblast hoření je závislá na vytváření kyslík oproti kinetické oblasti hoření, která je závislá na rychlosti chemické reakce (Svatoň, 2000).

3.3.3.1 *Druhy plamene*

Podle velikosti ploch hoření rozeznáváme laminární a turbulentní plamen. Laminární plamen vzniká u malých ploch, jako je svíčka či hořák. S větší rychlostí hoření plynů, kdy se zvětšuje plocha hoření a hoření se urychluje vzniká turbulentní plamen.

Podle viditelnosti rozdělujeme plamen na tři druhy:

- svítivý – plamen má k hoření k dispozici jen menší množství kyslíku, a to má za následek volný uhlík v plamenu – plamen je viditelný,
- nesvítivý – hořlavina obsahuje >50 % kyslíku, uhlík shoří a plamen není viditelný,
- čadivý – kyslík je obsažen ve velmi malém až žádném množství, oproti uhlíku, který nestačil shořet a uvolňuje se formou sazí – čadivý plamen (Svatoň, 2000).

3.3.3.2 *Teplota hoření*

Teplota plamene se pohybuje v rozmezí 500 °C až 5 000 °C. Příklady teplot různých zdrojů plamene ukazuje tab. 2.

Tab. 2: Příklad teplot zdrojů plamene

Zdroj plamene	Teplota °C
Plynový hořák	1 700-1 975
Hořící zápalka	650-800
Svíčka	850-940
Cigareta	450-600
Acetylén	Okolo 2 200

Zdroj: (Svatoň, 2000)

Rozložení teplot v objemu a výšce plamene je následek rozložení koncentrace reagujících látek. Jelikož je teplo spotřebováno na ohřev a rozklad oxidovadla, nedosahuje teplota maxima ani v dolní části plamene, kde se nachází stechiometrická směs s nejvyšší výhřevností (Svatoň, 2000).

3.3.3.3 Rychlost šíření plamene

U hoření dřeva, jakožto pevné látky, jsou obecně rozeznávány 2 druhy hoření. Jedná se o hmotnostní rychlost hoření a lineární rychlost hoření. Hmotnostní rychlost hoření označuje hmotnost spálené látky za jednotku času na zvolený průřez ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$). Lineární rychlost hoření je hmotnostní rychlost hoření vztažená k hustotě ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Tab. 3: Rychlost hoření tuhých materiálů

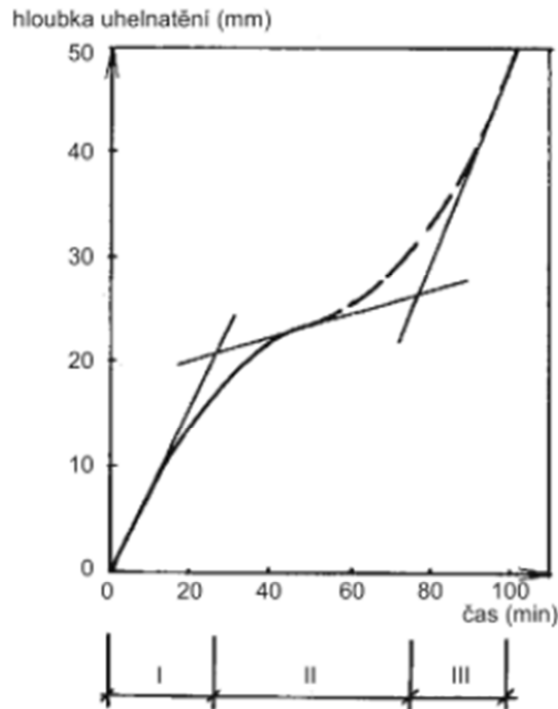
Název	Střední rychlost hoření [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$]
Dřevo (14% vlhkosti)	50
Přírodní kaučuk	30
Fenoplasty	10
Papír	30

Zdroj: (Bučko, Osvald, 1997)

Rychlost odhořívání povrchových vrstev dřeva směrem k jádru se na základně výzkumů u nosníků ze smrkového dřeva pohybuje následovně:

- z boku - $0,65 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,
- zespoda - $0,95 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Jednotlivé fáze odhořívání nejsou lineárně závislé, takže rychlost odhořívání se mění (obr. 6). S tímto faktem je potřeba počítat například při navrhování požární odolnosti konstrukcí (Kupilík, 2006).



Obr. 6: Rychlost odhořívání dřeva při konstantní teplotě 800 °C

Zdroj: (Kupilík, 2006)

3.4 Antipyrény a jejich vliv na ochranu dřeva

Antipyrény nebo také též retardéry hoření, jsou látky, které snižují hořlavost dřeva a jiných hořlavých materiálů. Dřevo, jako materiál lehce až středně hořlavý, má antipyrén zvýšit odolnost na úroveň materiálů těžce hořlavých. Antipyrény dokáží usměrnit různé reakční a přenosové děje ve dřevě nebo jiném hořlavém materiálu, díky čemuž oddalují jeho termický rozklad, vznícení či vzplanutí a samotné hoření. Dalo by se tvrdit, že to jsou látky, které mají ohnivzdorné vlastnosti a tím zvyšují požární odolnost materiálů v konstrukci (Reinprecht, 2008).

Při ochraně dřeva proti ohni není možné počítat s úplnou a stálou nehořlavostí dřeva. Lze ale snížit zápalnost a zpomalit proces hoření a termické degradace dřeva s použitím vhodných opatření, tedy antipyrénů. Díky těmto vlastnostem antipyrénů jím také říkáme retardéry (retardace = zpomalení, zpoždění).

Snížit zápalnost a zpomalit proces hoření lze dosáhnout několika způsoby:

- ochranným obalem – dřevo je chráněné ochranným obalem proti zahřátí a vyšší teplota tím se oddaluje tvorba hořlavých plynů,
- zabránění přístupu kyslíku ke dřevu,
- podporováním zuhelnatělé vrstvy, která chrání dřeva a zpomaluje proces hoření,
- zamezením žhavení zuhelnatělé vrstvy – omezení iniciačních zdrojů a tím se snižuje možnost šíření dalšího požáru,
- úpravou povrchu a spojů dřeva – oddálení možnosti iniciace hoření (Svatoň, 2000).

3.4.1 Požadavky kladené na ochranu dřeva s použitím antipyrénů

Stejně jako na každou jinou látku sloužící ke zlepšení vlastností dřeva, jsou i na antipyrén vztaheny požadavky. Všechny požadavky ale žádný antipyrén nespĺňuje, proto je důležité vybrat vhodný ošetřující prostředek na daný účel. Nejčastěji požadované vlastnosti jsou rozděleny na základní a vedlejší:

- základní požadované vlastnosti:
 - odolnost proti ohni,
 - zpomalování hoření,
 - zhášení ohně,
 - zamezení dodatečného žhavení zuhelnatělé vrstvy.
- vedlejší požadované vlastnosti:
 - trvanlivost ochranné látky ve dřevě,
 - dobrá přilnavost, nebo vnikání do dřeva,
 - možnost všestranného použití,
 - jednoduchá příprava a použití,
 - absence korozivních účinků,
 - nesmí snižovat mechanické vlastnosti dřeva,
 - možnost povrchové úpravy po provedení ochranných prací,

- nesmí snižovat pevnost lepených spojů,
- nízká cena a dostupnost,
- zdravotní nezávadnost (Svatoň, 2000).

3.4.2 Fyzikální účinky antipyrénů

Hoření je děj, při kterém dochází k přenosu hmoty a tepla. Fyzikální účinky antipyrénů pracují zejména na omezení a regulování těchto jevů a dále ředěním hořlavých plynů (Reinprecht, 2008).

3.4.2.1 Omezení přenosu hmoty

Látky, které vytvoří na vnějším nebo vnitřním povrchu dřeva vrstvu, omezí přenos kyslíku do dřeva a hořlavých plynů ze dřeva a vytvoří tím nepříznivé podmínky pro hoření dřeva.

Vrstva na vnějším povrchu dřeva – vytvoří tavitelné látky na bázi vodního skla, ale v současnosti zejména látky pěnotvorné (intumescentní látky).

Vrstva na vnitřním povrchu dřeva – tato vrstva se nachází mezi prostorem lumenů buněk a vrstvou buněk stěn. Zde se nachází látky typu boritanů, které ve formě vodních roztoků dokáží penetrovat hlouběji do dřeva a tam při teplotách aktivní pyrolýzy vytvářejí tavitelnou glazuru.

Jak v případě ochranné vrstvy na vnějším povrchu dřeva, tak ochranné vrstvy na vnitřním povrchu dřeva, se snižuje intenzita přenosu kyslíku a intenzita přenosu hořlavých plynů (Reinprecht, 2008).

3.4.2.2 Omezení přenosu tepla

K omezení intenzity přenosu tepla nastane v situaci, kdy se vnější povrch dřeva obalí souvislými tepelně-izolačními vrstvami. Tyto vrstvy nazýváme vrstvami intumescentními.

Intumescentní tepelně-izolační vrstvy neboli také tuhé pěnové vrstvy, se tvoří z nátěrů či folií, které jsou termicky namáhány. Děje se tak složením některých chemických a fyzikálních dějů. Při teplotách nad 150 °C se vytváří na povrchu dřeva silná, nehořlavá, tepelně-izolační vrstva mikroporézní pěnové sktruktury. Tato vrstva chrání dřevo proti ohni a sálavému teplu až 30 minut. K nánosu intumescentní vrstvy dochází výhradně pomocí vodní disperze v tenké vrstvě na povrch dřeva. Vlivem tepla se tenká vrstva napění a vytváří tuhou vrstvu odolnou vůči ohni a brání přestupu kyslíku a hořlavých plynů do dřeva. Důležitým parametrem pro pěnovou vrstvu je expanzní faktor, který určuje poměr tloušťky pěnové vrstvy vzhledem k tloušťce vrstvy původní. Například při expanzním faktoru 1:50 se z tloušťky nátěru 0,2 mm vytvoří pěnová vrstva 10 mm. Praktická aplikace předpokládá vrstvu tuhé pěny alespoň 5 mm, která odpovídá 300 až 500 g nánosu nátěru na m² plochy dřeva (Reinprecht, 2008).

V intumescentních nátěrech se nachází tyto složky:

- makromolekulové látky – mají vlastnost přecházet do taveniny a po zpěnění se vytvoří tuhý uhlíkový skelet. Látky s tímto efektem jsou zejména polyalkoholy, polyvinylacetáty a jejich polymery, polyamidy, polyuretany, polyaminofosfáty a epoxidy,
- zpěňovadla – tyto látky při teplotách nad 105 °C a v přítomnosti katalizátorů vytvářejí nehořlavé plyny. Konkrétně to jsou látky jako močovina, melamin, metylmočovina, dikyandiamid a hexametylentetramin,
- katalyzátory – mají za úkol regulovat tenkou vrstvu protipožárního nátěru při přeměně na tuhou pěnu. K tomu dochází, když vzniká tavenina, která zajišťuje rozklad zpěňovadla na nehořlavé plyny, které následně napěňují viskózní taveninu polymeru. Vzápětí, kdy se napění makromolekulová látka, je možná přeměna na uhlíkový povrch. Tuto úlohu plní látky soli kyseliny fosforečné,
- přísady – upravují vlastnosti látky ke zlepšení stability, přilnavosti, barevnosti, světelné stálosti. Mohou zvýšit i pevnost pěny. Dále mohou přispět k vyšší odolnosti nátěru vůči povětrnostním podmínkám a biologickým škůdcům (Reinprecht, 2008).

3.4.2.3 *Ředění hořlavých plynů*

Je známo, že hořlavé plyny se uvolňují při termickém rozkladu dřeva. Srážky molekul kyslíku s molekulami hořlavých plynů se sníží při kontaktu s nehořlavými plyny. Jedná se o vodu ve formě páry, oxid uhličitý či amoniak. Tvorba reakčního tepla se snižuje pomocí přemístění hořlavých plynů od povrchu dřeva až za zónu aktivní pyrolýzy difuzí a tokem. Protože se k povrchu dostává méně aktivačního tepla, je požár méně rozvinutý (Reinprecht, 2008).

3.4.3 Chemické účinky antipyrénů

Chemické účinky antipyrénů se skládají z chemických reakcí, které by měli snižovat množství kyslíku těsně v okolí povrchu dřeva a ve dřevě. Dále regulovat rozklad dřeva na uhlíkový povrch, který negativně ovlivňuje tvorbu hořlavých plynů.

Látky schopné vázat na sebe kyslík a tím regulovat jeho množství v oblasti aktivní pyrolýzy, jsou nápomocné v omezení procesu hoření. Jedná se o látky jako halogenidy, nejčastěji chloridy a bromidy.

Katalická dehydratace polysacharidů neboli karbonizace dřeva, patří k endotermickým reakcím. Z polysacharidů (celulóza, hemicelulóza) se uvolňuje voda a tím jsou polysacharidy výrazně náchylnější na karbonizaci. Menší rozklad dřeva na hořlavé plyny má za následek výrazné snížení procesu termického rozkladu. Jedná se zejména o látky na bázi kyseliny fosforečné nebo také například kyseliny sírové či chlóróvodíkové (Reinprecht, 2008).

3.4.4 Rozdělení antipyrénů podle původu

Aktuálně se jako ochranný prostředek proti ohni nejvíce používají antipyrény ve formě vodních roztoků anorganických sloučenin. V menší míře se lze setkat s formou organických sloučenin. Účinek těchto ochranných látek závisí nejen na způsobu použití a způsobu nanášení, ale také na správném výběru typu antipyrénu. Žádná látka nesplňuje všechny požadavky, a proto dochází vývoji co nejvhodnějších směsí pro daný účel. Jen tak lze zkombinovat nejlepší vlastnosti jednotlivých látek a tím zabezpečit

účinný prostředek. Jak si lze všimnout z předcházejících řádků, rozdělujeme antipyrény na ve vodě rozpustné anorganické a organické.

3.4.4.1 Ve vodě rozpustné anorganické ochranné látky

Amonné soli. Zejména se používá fosforečnan amonný a dále pak síranu amonného, bromidu amonného, chloridu amonného a tetrátboritanu amonného. Fosforečnany dobře chrání dřevo už při aplikaci nátěrem. Síran a ostatní soli mají dobré ochranné vlastnosti jen při aplikaci tlakovou impregnací. Všechny amonné soli mají negativum v podobě korozivních účinků na kovové předměty. Naproti tomu účinně snižují žhavení dřevěného uhlí.

Fosforečnany. Kromě výše uvedených sloučenin se používá také velmi účinný terciální fosforečnan draselný. Jako amonné soli má také korozivní účinky a je hygroskopický.

Sírany. Jako neúčinnější se jeví síran amonný a dále síran hlinitý, síran hlinito-draselný, síran hořečnatý. Nevýhody síranu hlinitého a síranu hlinito-draselného je, že velice lehko zvětrávají a ztrácejí tím svoji účinnost. Síran hořečnatý je hygroskopický. Všechny uvedené sírany mají korozivní účinky.

Chloridy a bromidy. Mezi nejvíce známé chloridy a bromidy patří zejména chlorid hořečnatý, chlorid zinečnatý, chlorid vápenatý, chlorid hlinitý, chlorid amonný a bromid amonný. Nejvyšší účinnost lze dosáhnout tlakovou impregnací. Aplikace nátěrem je velice málo účinná.

Uhličitan. Za nejvíce účinné uhličitan lze určit uhličitan draselný a uhličitan sodný. Na rozdíl od uhličitanu sodného je uhličitan draselný účinný už při aplikaci nátěrem. Uhličitan sodný je třeba aplikovat tlakovou impregnací. Uhličitan draselný je hygroskopický a obě látky mají korozivní účinky.

Boritany. Při tlakové impregnaci lze dosáhnout vysoké odolnosti, a to nejen proti hoření, ale i proti houbám a plísním. K účinným látkám řadíme kyselinu boritou, tetraboritan amonný a tetraboritan sodný. Tyto látky nemají korozivní účinky, ale mohou se lehce vylouhovat vodu.

Vodní sklo. Jedná se o koloidní roztok křemičitanu sodného nebo křemičitanu draselného. Používá se zejména jako formou nátěru nebo postřiku, tudíž nelze aplikovat

pomocí tlakové impregnace. Vodní sklo se při vysokých teplotách rozpouští, čímž vytváří ochrannou vrstvu na povrchu dřeva. Proto se stává velice účinným ochranným prostředkem a v dnešní době je jeden z nejvíce používaných prostředků na ochranu dřeva před požárem. Mezi negativní vlastnosti vodního skla patří zvětrávání, a to vcelku krátkém časovém úseku. Zvětráváním se narušuje souvislá vrstva nátěru a dochází k jejímu odlupování. K zamezení této nevýhody lze předejít jen pravidelnou obnovou nátěru a omezení použití vodního skla ve vlhkých prostředích (Horský, 1987).

3.4.4.2 Organické látky

Citráty. Mezi účinné látky patří soli kyseliny citrónové. Z ekonomického důvodu a z důvodu malé účinnosti je však její použití velmi malé.

Umělé živice. Nátěry na močovino-formaldehydové bázi a díky andiaminové živice mají dobrou účinnost proti požáru, ale jejich použití není samostatné. Jako další složka se používá primární nebo sekundární fosforečnan amonný. Tyto příměsi pomáhají živícím v ochraně dřeva pěnovou vrstvou. Nepoužívají se proto pro aplikace hloubkových impregnací (Horský, 1987).

Zbylé látky organického původu pro ochranu dřeva se kvůli malé účinnosti nepoužívají. Jejich použití se zužuje pouze na příměsi nebo pro doplnění množství jiných retardérů (Horský, 1987).

3.4.5 Způsoby aplikace antipyrénů

Stejně jako výběr vhodného složení antipyrénu je pro daný účel neméně důležitá i jeho aplikace. Ne každá aplikace ochranného prostředku proti požáru se hodí pro všechny účely a podmínky. Dřevo pro venkovní použití, které je vystaveno nepříznivým atmosférickým podmínkám je vhodné ošetřit zejména hloubkovou ochranou. Dřevo s určením pro interiér je možné ošetřit povrchovou ochranou (Horský, 1987).

Prostředky pro ochranu dřeva proti ohni se používají zejména ve formě kapalin. Pro aplikaci antipyrénů se nejčastěji používají dva způsoby. Jedná se o povrchové ošetření dřeva a o hloubkovou impregnaci dřeva (Reiprecht, 2008).

3.4.5.1 Povrchové ošetření dřeva antipyrénem

U povrchového ošetření dřeva dochází k aplikaci látky nátěrem, nástřikem, nánosem nebo ponorem či krátkodobým máčením. Vzhledem k tomu, že tyto metody jsou založené na využití hybných sil jako difúzi a kapilárního tlaku, je tloušťka ošetřené vrstvy pouze menší než 2 mm v tangenciálním nebo radiálním směru (Reinprecht, 2008).

Ochranný prostředek je potřeba nanést stejnoměrně v několika vrstvách. U technologie stříkání je důležité zajistit vzdálenost trysek od ošetřovaného dřeva ve stejné vzdálenosti po celý čas aplikace, aby nedocházelo přílišnému rozstříku a ochranné látky. Výhoda stříkání spočívá v rychlosti aplikace a ochranná látka se dostane do míst, kde by aplikace nátěrem byla nemožná. Proto je aplikace stříkáním vhodnější pro dřevěné konstrukce a složitější konstrukční prvky (Horský, 1987).

Jako náhradu za natírání a stříkání je možné použít krátkodobé máčení či ponor. Obě metody lze aplikovat též v několika vrstvách jako nátěr a nástřik, ale je třeba dávat pozor na tvorbu vzduchových bublinek, které mohou vznikat na povrchu dřeva. Rozdíl mezi ponorem a máčením je zejména v čase. Ponor trvá několik sekund až minut a zpravidla od 15-ti minut se jedná o máčení (Reinprecht, 2008).

3.4.5.2 Hlubková impregnace dřeva antipyrény

Tlakovou impregnaci lze zařadit mezi průmyslové způsoby impregnace dřeva. Největší výhodou tlakové impregnace je zejména vysoká míra hloubky ošetřeného místa dřeva. Ve většině případů dochází zcela k průniku ochranné látky bělí až k jádru. Při dobré impregnovatelnosti dřeva je ošetřeno i jádro. Metoda je založena na zvýšení tlaku (zpravidla 0,8 MPa) nebo vakua (0,2 MPa) nebo kombinace tlaku a vakua (Holan, 2006).

Tento způsob ochrany ale není vhodný pro všechny druhy látek. Například vodním sklem impregnovat nelze, neboť obsahuje pevné částice, které do dřeva nevnikají. Pro hlubkovou impregnaci se používají tlakové kotle jako pro impregnaci dřeva proti biotickým činitelům.

Tlaková impregnace dosahuje větší účinnosti v ochraně dřeva s porovnáním s povrchovým ošetřením dřeva. U aglomerovaných materiálů je možnost použití ochranné látky přímo do hmoty materiálu. Tím lze dosáhnou stejných výsledků v ochraně jako při použití tlakové impregnace. Je třeba ale počítat s reakcí lepidla a ochranného prostředku a zvolit podle toho vhodnou kombinaci (Horský, 1987).

4 Metody hodnocení hořlavosti materiálů

4.1 Hodnocení protipožární odolnosti dřeva

Základní myšlenkou hodnocení protipožární odolnosti dřeva, tedy testování jeho odolnosti, je co nejdokonaleji simulovat podmínky požáru, aby dokázalo odhalit chování materiálů při požáru. Kvalita testu a jeho objektivita je tedy nesmírně důležitá pro výběr materiálů s dobrými požárně-technickými vlastnostmi.

Postupem času se dospělo ke zkvalitnění testovacích metod a k harmonizaci podmínek testování a aplikací výsledků. Aktuálně posledním stupněm vývoje norem jsou testovací normy EU, které hodnotí stavební materiály několika druhy testovacích metod. Více druhů testovacích metod s pevně stanovenými kritérii přináší objektivnější hodnocení (Osvald, 2009).

4.1.1 Testování podle norem EU

Testování podle norem EU má za úkol zkvalitnit a zharmonizovat postup na klasifikaci reakce stavebních materiálů na oheň pro všechny členské státy EU. Postup zkoušení platí pro dvě kategorie: stavební výrobky kromě podlahových krytin a podlahové krytiny. Pro testování a klasifikaci požárních charakteristik se výrobků a stavebních prvků podle STN EN 13501-1 se používají tyto zkušební postupy:

- zkouška nehořlavosti STN EN ISO 1182. V této zkoušce se určují výrobky a stavení prvky, které významně nepřispívají k požáru bez ohledu na jejich konečné použití. Zkouška je určena pro třídy A1, A2, A1fi, A2fi,
- zkouška spalného tepla STN EN ISO 1716. Zjišťuje se nejvyšší možná hodnota celkového uvolněného tepla při úplném spálení výrobku, bez ohledu na jeho konečné použití. Tato zkouška je určena pro třídy A1, A2, A1fi, A2fi,
- zkouška osaměle hořícího předmětu STN EN 13823. Touto zkouškou se zjišťuje možný vliv výrobku na rozvoj požáru při simulaci požáru osaměle hořícího předmětu v rohu místnosti blízko zkoušeného výrobku. Zkouška je určena pro třídy A2, B, C, D,

- zkouška zápalnosti STN EN ISO 11925-2. Tato zkouška podává informace o zapalitelnosti výrobku při vystavení účinkům malého plamene. Zkouška je určena pro třídy B, C, D, E, Bfi, Cfi, Dfi, Efi,
- zjišťování chování podlahových krytin při hoření s použitím sálavého zdroje tepla STN EN ISO 9239-1. Zjišťuje se kritický sálavý tok, při kterém se plameny přestanou šířit po vodorovném povrchu. Zkouška je určena pro třídy A2fi, Bfi, Cfi, Dfi (Osvald, 2009).

Tab. 4: Třídy reakce na oheň stavebních výrobků kromě podlahových krytin

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

Zdroj: (Osvald, 2009)

Tab. 5: Třídy reakce na oheň podlahových krytin

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

Zdroj: (Osvald, 2009)

Vysvětlivky k tab.:

- (1) pro homogenní prvky a významné prvky nehomogenních výrobků,
- (2) pro každý vnější nevýznamný prvek nehomogenních výrobků,
- (2a) pro každý vnější prvek mající PSC 2,0 MJ.m⁻², za předpokladu, že výrobek splňuje následující kritéria EN 13823: FIGRA ≤ 20W.s⁻¹ a LFS okraj zkušebního vzorku a THR_{600s} ≤ 4,5 MJ a s1 a d0,

- (3) pro každý vnitřní nevýznamný prvek nehomogenních materiálů,
- (4) pro výrobek jako celek,
- (5) v poslední fázi výroby se zavedli změny systému měření dýmu, jejichž účinek si vyžaduje další zkoumání. Zjišťování hraničních hodnot a parametrů tvorby dýmu se mohou podle toho změnit. $s1 = \text{SMOGRA} \leq 30 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ a $\text{TPS}_{600\text{s}} = \leq 50 \text{ m}^2$. $s2 = \text{SMOGRA} \leq 180 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ a $\text{TPS}_{600\text{s}} = \leq 200 \text{ m}^2$. $s3 =$ nesplňuje $s1$ nebo $s2$,
- (6) $d0$ =žádné hořící kapky/částice při zkoušce podle EN 13823 v čase 600 s, $d1$ =žádné hořící kapky/částice trvající déle než 10 s podle EN 13823 v čase 600 s, $d2$ =nesplňuje $d0$ nebo $d1$,
- (7) vyhovuje=bez zapálení papíru (bez klasifikace). Nevyhovuje=zapálení papíru (klasifikace $d2$),
- (8) v podmínkách vystavení povrchu vzorku plamenu a v případě vhodnosti, z hlediska konečného užívání i vystavení hrany vzorku plamenu,
- (9) délka zkoušky 30 min,
- (10) kritický tok je určený jako tok sálavého tepla, při kterém plamen zhasne, anebo tok sálavého tepla po 30 minutách zkoušky podle toho, který z nich je nižší (to je tok zodpovídající největšímu rozšíření plamene), $s1 = \text{dym} \leq 750 \text{ \% minut}$,
- (11) $s2$ =nesplní $s1$,
- (12) v podmínkách vystavení povrchu vzorku plamenu a v případě vhodnosti, z hlediska konečného používání i vystavení hrany vzorku plamenu (Osvald, 2009).

4.1.2 Reakce termicky modifikovaného smrkového dřeva na otevřený oheň

Práce, která popisuje reakci termicky modifikovaného dřeva (Thermowoodu) ze smrku na otevřený oheň, byla publikována na vědeckém portálu BioResources. Jedná se o měření a porovnání odolnosti smrkového dřeva v různých částech tepelné modifikace a dřeva rostlého bez tepelné modifikace. Autory výzkumu a článku jsou Hana Čekovská, Milan Gaff, Anton Osvald, František Kačík, Jiří Kubš a Lukáš Kaplan.

4.1.2.1 Materiály

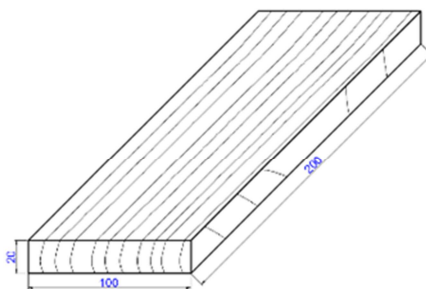
Výzkum tvořily dva základní zkušební soubory. První soubor tvořili vzorky termicky upraveného smrku, při teplotách 160 °C, 180 °C, 210 °C (vzorky S-160, S-180, S-210), druhý soubor zkušebních těles je tvořen z neupraveného smrkového dřeva (označený S-20). Proces termické modifikace probíhal podle:

1. Ohřev a sušení – V tomto stupni se teplota v peci rychle zvyšuje na 100 °C, aby se podpořilo působení páry. Pak se rychlost zvyšování teploty klesá a zvyšuje se na úroveň 130 °C. Sušící médium je horký vzduch nebo horká pára. Během této fáze se dřevo suší přibližně na nulovou vlhkost.
2. Tepelná modifikace – Ve druhém stupni se teplota zvýší na úroveň 185–230 °C po dobu 2–3 hodin. Výška teploty a trvání děje jsou určeny podle požadavků tříd THERMOWOOD (Thermo-S a Thermo-D)
3. Chlazení a klimatizace – Ve třetím stupni se tepelně modifikované dřevo postupně ochladí na teplotu 80–90 °C a vlhkost se stabilizuje tak, aby konečná vlhkost byla 4–7 %.



Obr. 7: Vzorky podle stupně termické úpravy

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)



Obr. 8: Rozměry zkušebního vzorku

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

Průměrné hodnoty sledovaných souborů zkušebních těles jsou uvedené v Tab. 6.

Tab. 6: Průměrné hodnoty sledovaných souborů zkušebních těles

Testovací soubor	S 20	S 160	S 180	S 210
Hustota (kg.m ⁻³)	447	645	452	430
Vlhkost (%)	2.9	2.8	2.8	2.8

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

4.1.2.2 Hodnocení a výpočty

K určení vlivu jednotlivých faktorů na ohybové charakteristiky byla provedena analýza rozptylu (ANOVA) a Fischer F-test pomocí softwaru Statistica 12 (Statsoft Inc., USA).

Hustota dřeva byla stanovena před a po testování podle ISO 13061-2 (2014) vz. 1.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (3)$$

kde ρ_w je hustota vzorku při obsahu vlhkosti w (kg / m³); m_w je hmotnost (hmotnost) vzorku při obsahu vlhkosti w (kg); a_w , b_w a l_w jsou rozměry vzorku při obsahu vlhkosti w (m); a V_w je objem vzorku při obsahu vlhkosti w (m³).

Obsah vlhkosti ve vzorcích byl stanoven a ověřen před a po testování. Tyto výpočty byly provedeny podle ISO 13061-1 (2014) a rovnice (4).

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (4)$$

kde w je obsah vlhkosti ve vzorcích (%), m_w je hmotnost (hmotnost) vzorku při obsahu vlhkosti w (kg) a m_0 je hmotnost vzorku v sušárně (kg). Sušení bylo provedeno podle ISO 13061-1 (2014).

Hlavním hodnotícím kritériem je úbytek hmotnosti zkušebních těleších, který se vypočítá podle rovnice (5).

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} . 100 \quad (5)$$

kde: Δm je ztráta na hmotnosti (%), m_1 hmotnost vzorku před zkouškou (g), m_2 hmotnosti vzorku po zkoušce (g).

Rychlost odhořívání jsme vypočítali podle rovnice (6).

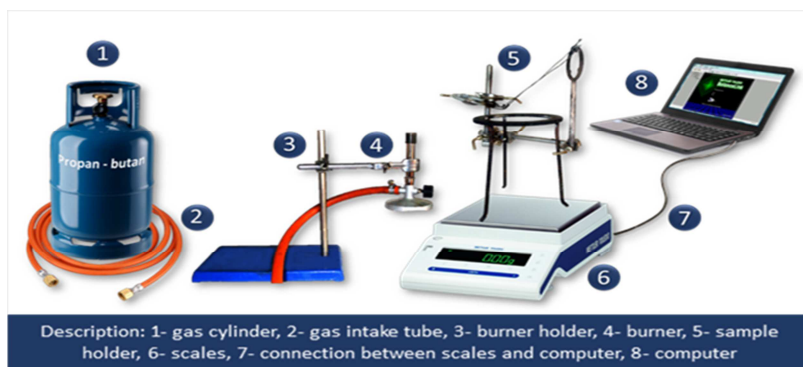
$$v = \frac{m_t - m_{t+10} + 10}{m_{t0} * 10} \cdot 100 \quad (6)$$

kde m 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.

4.1.2.3 Metoda

Pro zjišťování vlastností ve vztahu k hoření termicky upraveného dřeva jsme navrhli novou hodnotící metodu. Tato metoda se skládá z přímého působení plynového hořáku na zkušební těleso za určitý čas 10 minut. Schéma zařízení je uvedené na obr. 9. Zkušební těleso je umístěné pod úhlem 45° vůči vodorovné rovině. Velikost plamene je 10 cm od ústí hořáku a umisťuje se do středu zkušební tělesa ze spodní strany. Základní měření probíhá 10 minut. V naší metodě jsme pokračovali druhou částí zkoušky. V druhé části jsme odsunuli plamen od vzorků a dále jsme zaznamenávali úbytek na hmotnosti a rychlost odhořívání dalších 5 minut. Prodloužením času měření o 5 minut jsme zjišťovali průběh odhořívání, protože jsme předpokládali, že v žhavé vrstvě dřeva bude dále pokračovat degradace dřeva a může dojít i k opětovnému vznícení a vzplanutí. Metoda simuluje přirozený proces hoření dřeva s plamenným zdrojem, trvalým přístupem vzduchu a volným prouděním spalín.

Jako zdroj plamene jsme použili kahan typ USBEC 1011/1 propan, DIN – DVGW – Reg. Nr. NG – 2211AN0133, blastung 1,7 kW. Hmotnost jsme zjišťovali na vahách Mettler Toledo typ NEW CLASSIC MF, model MS 1602S / MO1 (Mettler Toledo, Swisse). Na záznam průběhu vážení jsme využívali software BalanceLink (Mettler Toledo, Swisse). Během testu hořlavosti jsme zaznamenávali průběžným vážením a pomocí softwaru BalanLink úbytek hmotnosti v intervalu 10 sekund. Z naměřených hodnot můžeme zjistit úbytek na hmotnosti a průměrné rychlosti odhořívání. Výsledkem rychlosti odhořívání jsou zpracovány v grafech. Průběh odhořívání popisuje rychlost hoření v průběhu 15 minut.



Obr. 9: Potřebná zařízení pro měření

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

4.1.2.4 Výsledky a diskuze

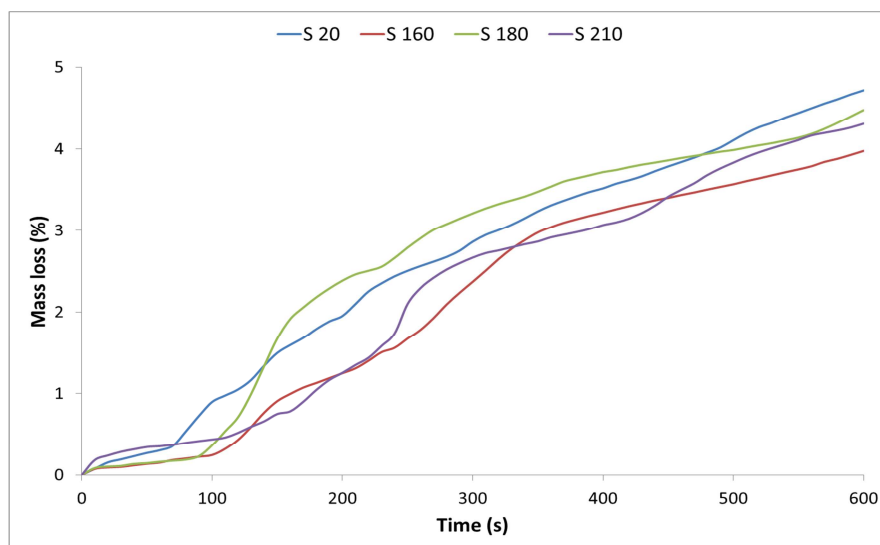
Výsledky ukazují, že tepelně upravené smrkové dřevo má nižší úbytek na hmotnosti při spalování po 10 minutách než neupravené smrkové dřevo (Tab. 7).

Tab. 7: Výsledky měření 0-600 s

čas (s)	S-20 Δm (%)	S-160 Δm (%)	S-180 Δm (%)	S-210 Δm (%)	čas (s)	S-20 Δm (%)	S-160 Δm (%)	S-180 Δm (%)	S-210 Δm (%)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	310	2.95	2.51	3.27	2.72
10	0.08	0.07	0.08	0.18	320	3.01	2.65	3.33	2.76
20	0.15	0.09	0.10	0.24	330	3.07	2.78	3.37	2.79
30	0.19	0.10	0.11	0.28	340	3.15	2.88	3.42	2.83
40	0.23	0.12	0.13	0.31	350	3.24	2.98	3.48	2.87
50	0.27	0.14	0.14	0.34	360	3.31	3.04	3.54	2.92
60	0.30	0.15	0.16	0.35	370	3.37	3.10	3.60	2.95
70	0.36	0.18	0.17	0.37	380	3.42	3.14	3.64	2.98
80	0.54	0.20	0.19	0.40	390	3.48	3.18	3.68	3.02
90	0.73	0.22	0.23	0.42	400	3.52	3.22	3.72	3.07
100	0.90	0.24	0.36	0.44	410	3.57	3.26	3.74	3.10
110	0.97	0.32	0.54	0.46	420	3.62	3.30	3.78	3.15
120	1.05	0.43	0.71	0.52	430	3.67	3.33	3.81	3.22
130	1.17	0.59	1.00	0.59	440	3.73	3.37	3.83	3.31
140	1.34	0.77	1.34	0.66	450	3.79	3.40	3.86	3.41
150	1.50	0.91	1.67	0.75	460	3.84	3.44	3.89	3.50
160	1.59	1.00	1.92	0.78	470	3.89	3.47	3.91	3.58
170	1.68	1.07	2.06	0.90	480	3.95	3.50	3.94	3.68
180	1.79	1.13	2.18	1.04	490	4.02	3.54	3.97	3.76
190	1.89	1.19	2.29	1.17	500	4.11	3.57	3.99	3.83
200	1.95	1.25	2.39	1.25	510	4.20	3.61	4.02	3.90
210	2.10	1.31	2.46	1.35	520	4.27	3.64	4.05	3.96
220	2.25	1.40	2.51	1.44	530	4.32	3.68	4.07	4.01
230	2.35	1.51	2.55	1.58	540	4.39	3.72	4.10	4.06
240	2.44	1.56	2.66	1.74	550	4.44	3.75	4.14	4.11
250	2.51	1.67	2.79	2.10	560	4.50	3.79	4.19	4.17
260	2.56	1.78	2.90	2.29	570	4.56	3.84	4.25	4.20
270	2.62	1.93	3.01	2.42	580	4.61	3.88	4.32	4.23
280	2.68	2.09	3.08	2.52	590	4.67	3.93	4.40	4.26
290	2.75	2.24	3.15	2.60	600	4.72	3.98	4.48	4.31
300	2.86	2.37	3.21	2.67	-	-	-	-	-

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

Nejnižší úbytek na hmotnosti 3.98 % má smrkové dřevo termicky modifikované při teplotě 160 °C. Následuje dřevo termicky modifikované při 210 °C s úbytkem hmotnosti 4.31 % a 180 °C s úbytkem hmotnosti 4.48 %. Nemodifikovaný smrk má úbytek na hmotnosti 4.72 % po 10 minutách od začátku zkoušky. V průběhu měření se úbytek hmotnosti měnil nepravidelně – nelineární a S-180 vykazoval v průběhu zkoušky největší úbytky na hmotnosti, ale nakonec byl úbytek hmotnosti nižší než u neupraveného smrku (Obr. 10).



Obr. 10: Graf úbytku na hmotnosti při hoření za čas 0-600 s

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

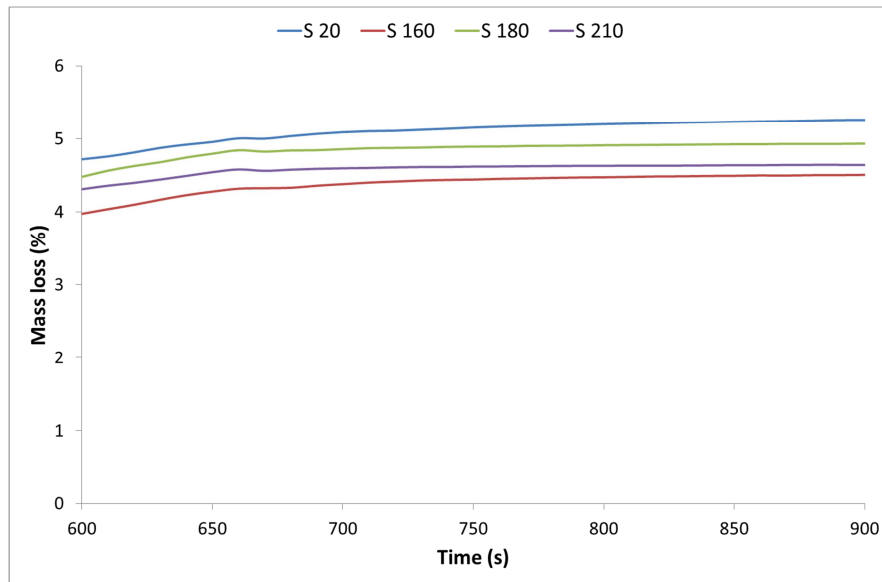
Ve druhé části zkoušky od 10 do 15 minuty jsme zjistili, že nedošlo k samovolnému hoření a úbytek na hmotnosti byl velmi malý (Tab. 8).

Tab. 8: Výsledky měření 600-900 s

čas (s)	S-20 Δm (%)	S-160 Δm (%)	S-180 Δm (%)	S-210 Δm (%)	čas (s)	S-20 Δm (%)	S-160 Δm (%)	S-180 Δm (%)	S-210 Δm (%)
600	4.72	3.98	4.48	4.31	760	5.16	4.45	4.89	4.62
610	4.76	4.04	4.56	4.36	770	5.17	4.46	4.90	4.62
620	4.81	4.10	4.63	4.40	780	5.18	4.46	4.90	4.63
630	4.87	4.17	4.68	4.44	790	5.19	4.47	4.90	4.63
640	4.92	4.23	4.74	4.49	800	5.20	4.47	4.91	4.63
650	4.95	4.28	4.79	4.54	810	5.21	4.48	4.91	4.63
660	5.00	4.32	4.84	4.58	820	5.21	4.48	4.91	4.63
670	5.00	4.32	4.82	4.56	830	5.22	4.49	4.92	4.63
680	5.04	4.33	4.84	4.58	840	5.23	4.49	4.92	4.63
690	5.07	4.36	4.84	4.59	850	5.23	4.49	4.92	4.64
700	5.09	4.38	4.86	4.59	860	5.24	4.50	4.92	4.64
710	5.10	4.40	4.87	4.60	870	5.25	4.50	4.93	4.64
720	5.11	4.41	4.87	4.61	880	5.25	4.50	4.93	4.64
730	5.12	4.43	4.88	4.61	890	5.26	4.50	4.93	4.64
740	5.14	4.44	4.89	4.61	900	5.26	4.51	4.93	4.64
750	5.15	4.44	4.89	4.62	-	-	-	-	-

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

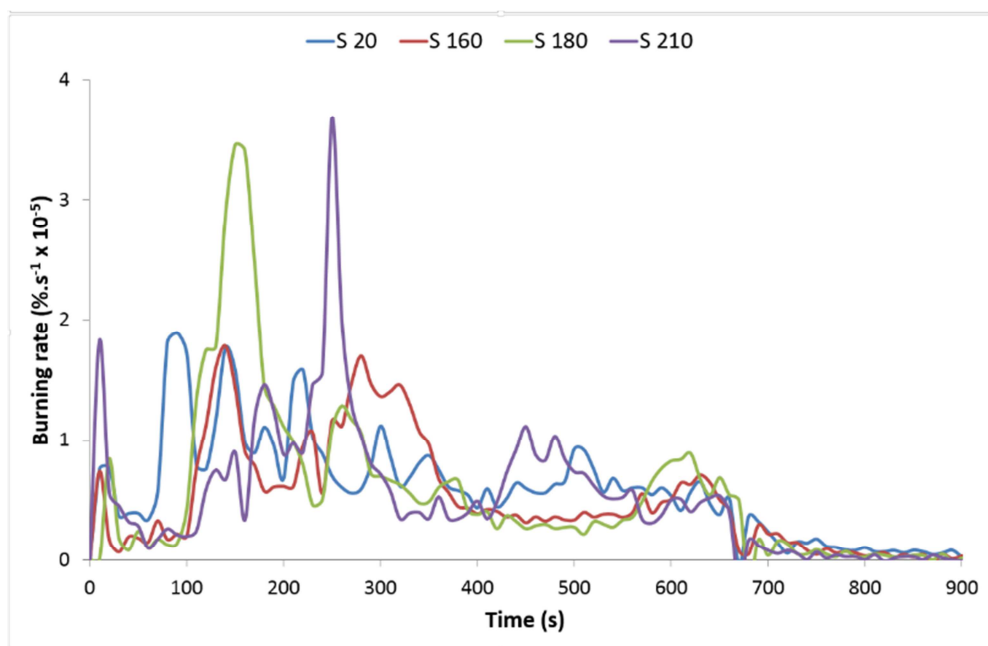
Termicky upravené dřevo má nižší úbytky hmotnosti než neupravené dřevo. Rozdíly v úbytku hmotnosti od 10 do 15 minuty jsou 0.33% u S-210, 0.46 u S-180, 0.53 % u S-160 a 0.54 % u neupraveného smrku. Náš předpoklad, že u termicky upraveného smrkového dřeva dojde k samovolnému hoření se nepotvrdil.



Obr. 11: Graf úbytku na hmotnosti při hoření za čas 600-900 s

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

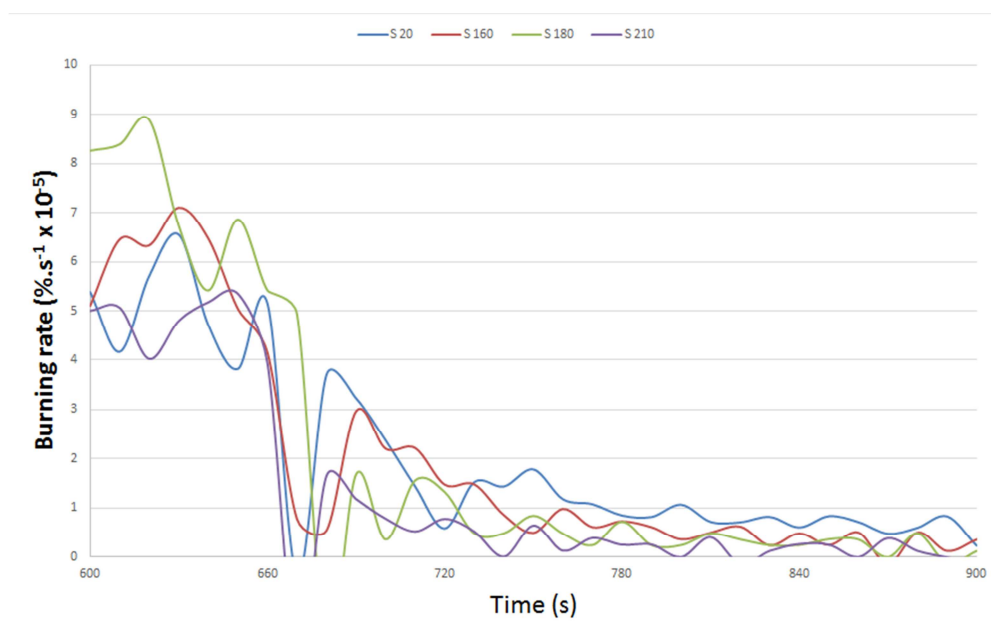
Nejvyšší rychlost odhořívání byla u smrku termicky modifikovaného při 210 °C, který začal intenzivně hořet v 30 s a opět v 250 s, na obrázku číslo 12 jsou 2 výrazné vrcholy.



Obr. 12: Rychlost odhořívání v čase 0-900 s

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

Rychlost odhořívání u smrku termicky modifikovaného při 180 °C se nejvyšší hodnota rychlosti odhořívání projevila mezi 140 a 160 s měření. Smrk s termickou modifikací při 160 °C vykazoval podobnou rychlost odhořívání jako neupravený smrk při 20 °C. Poslední zvýšení rychlosti odhořívání proběhlo v 10 minutě, na konci působení plamene zdroje a následně rychlost klesala. Od 11 minuty se rychlost odhořívání významně neměnila, což znamená, že dřevo přestalo hořet a žhavit.



Obr. 13: Rychlost odhořívání v čase 600-900 s

Zdroj: (Čekovská a kol., 2016)

Experiment potvrdil, že termická úprava dřeva nemá negativní vliv na vlastnosti dřeva, které jsou hodnoceny pro potřeby protipožární ochrany. Měření, které zobrazují grafy, jsou průměrné hodnoty z deseti měření (z 10 vzorků). Variabilita průměrných hodnot ve všech případech nepřesáhla hodnoty, které jsou charakteristické pro neupravené dřevo.

4.2 Hodnocení protipožární odolnosti antipyrénů

Účinnost ochranných látek a odolnost dřevin proti ohni se určuje zkušebními metodami, rozdělených do tří zkoušek:

- orientační – účinnost ochranné látky je stanovena jen orientačně, ale jedná se o rychlou zkoušku,

- laboratorní – účinnost ochranné látky je stanovena velice přesně. Zkouška se provádí za normovaných podmínek,
- praktické – zkoušení se provádí ve velkých zkušebnách na již kompletních výrobcích nebo v terénu. Pomocí těchto zkoušek se dostává názornějšího a přesnějšího obrazu o ochranném prostředku.

Z pohledu odolnosti dřeva proti požáru s použitím antipyrénů se stanovuje řada zkoušek a měření požárních vlastností. Testy, které se provádí při určování požárně technických charakteristik, jsou obdobné jako při určování požárně technických charakteristik materiálů bez použití antipyrénů (Svatoň, 2000).

5 Metodika práce

Na základě cílů bakalářské práce můžeme metodiku rozdělit do následujících bodů:

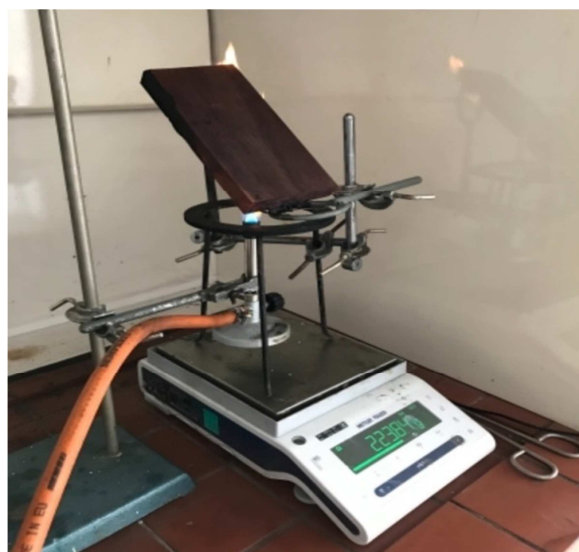
1. Příprava zkušebních těles,
2. Termická modifikace,
3. Testování,
4. Vyhodnocení naměřených materiálů.

5.1 Metodika experimentální části

Pro testování odolnosti dřeva proti ohni jsou dané Evropské normy, uvedené v kapitole 4.1.1, které jsou velice detailně definované, díky čemuž je měření velice přesné, ale jejich provádění je i velice náročné a málo praktické pro sledování parametrů různě modifikovaného dřeva. Proto byla pro experimentální část této práce zvolena jednodušší a lépe proveditelná metoda.

Metoda vycházela z normy ČSN 73 0862/B-2 (1991), ale hmotnost byla měřena nepřetržitě i během testu v časových intervalech 15-ti sekund. Jedná se o metodu již popsanou v kapitole 4.1.2., kdy byla použita také na soubor tepelně modifikovaných těles. Tato novější metoda dobře simuluje proces hoření dřeva s neustálým přístupem vzduchu a volným prouděním spalin.

Základním parametrem měření byl úbytek hmotnosti za 600 s. Mimo měření úbytku hmotnosti byla zjišťována i rychlost hoření, maximální rychlost hoření a také doba dosažení maximální rychlosti hoření.



Obr. 14: Měření úbytku hmotnosti při hoření na vzorcích bez protipožárního nátěru

Zdroj: vlastní



Obr. 15: Měření úbytku hmotnosti při hoření na vzorcích s protipožárním nátěrem

Zdroj: vlastní

5.2 Zkušební vzorky

Stejně jako u výše popsaného testování vzorků, byly zvoleny rozměry vzorků 200 mm * 100 mm * 20 mm ve směru axiální * radiální * tangenciální. Jako materiál vzorku byla vybrána tropická dřevina, padouk africký (*Pterocarpus soyauxii*).

Celkový počet vzorků byl stanoven na 40 kusů. Tento celek obsahoval 2 soubory po 20-ti kusech rozdělených na vzorky s ošetřením syntetickým antipyrénem a bez něj. Každý z těchto dvou souborů obsahoval 4 podsoubory po 5-ti kusech podle teploty tepelné modifikace (20 °C, 160 °C, 180 °C, 210 °C).

5.2.1 Příprava vzorků

Příprava vzorků před samotným měřením odolnosti proti ohni se skládá z:

- *tepelná modifikace* – vzorky byly tepelně modifikovány v tepelné komoře typu S400/03. Teploty pro konečnou úpravu vzorků byly zvoleny na 160 °C, 180 °C, 210 °C. Metoda využívaná pro tepelnou úpravu byla vyvinuta společností VTT (Finsko) a jedná se o metodu ThermoWood. tabulka 7 popisuje tři fáze termické úpravy vzorků. Samotný proces je detailněji popsán v kap. 3.2,
- *vysušení vzorků* – v sušárně ULM 400 při teplotě $t = 103$ °C. Pomocí vysušení se sjednotí vlhkost ve vzorcích a vzorky získají stejné vstupní podmínky,
- *zjištění hustoty vzorků* – hustoty před a po termické modifikaci popisuje tabulka 8,
- *označení vzorků* – pro snadné rozeznání je potřeba jednotlivé vzorky označit. Označení bylo uvedeno ve stylu PADOUK/stupeň termického zpracování (20, 160, 180, 210)/číslo vzorku(1-4)/vzorek s nátěrem (S) nebo bez nátěru (P),
- *nanesení antipyrénu* – nanesení je určeno pro jeden soubor vzorků, tedy 20 a probíhá nátěrem štětce,
- *zvážení vzorků* – vážení probíhalo na laboratorních vahách MS 1602S (Mettler Toledo, Greifensee, Switzerland) s přesností na setinu gramu.

Tab. 9: Procesy termické úpravy

	Proces termické úpravy		
	160 °C	180 °C	210 °C
Ohřívání	11.6 h	14.8 h	18.6 h
Tepelná modifikace	3 h	3 h	3 h
Chlazení	3.92 h	4.1 h	7.2 h
Celkový čas	18.52 h	18.8 h	28.8 h

Zdroj: vlastní

Tab. 10: Hustota před a po termické modifikaci

	Teplota modifikace vzorků (°C)			
	20 °C	160 °C	180 °C	210 °C
Hustota před modifikací (kg/m³)	803	711	688	668
Hustota po modifikaci (kg/m³)	803	673	660	634

Zdroj: vlastní

5.2.2 Antipyréní úprava vzorků

Pro testování protipožárních vlastností při použití syntetického antipyrénu byl použit protipožární nátěr Flamgrad (Stachema a.s., Rovinka, Slovensko). Jedná se o zpenitelnou, vodouředitelnou nátěrovou hmotu, která obsahuje koksotvornou složku, složku kyseliny fosforečné, napěňující složku, pojiva plnidla, aditiva a pomocné látky. Vrstva přípravku vytváří bílý matný povlak. Nátěr se aplikuje ve dvou vrstvách po cca 250 g/m² a celková vydatnost by měla být tedy dodržena na 500 g/m². Tabulka 11 popisuje podmínky nanášeného ochranného prostředku Flamgrad.

Tab. 11: Podmínky nanášení ochranného prostředku

Složka nátěru	pH	Hustota	Typ ředidla	Maximální obsah vlhkosti dřeva	Obsah netěkavých složek	Teplota prostředí při aplikaci	Doba vytvrzení
Povrchová složka	2–3	1.15 g/cm ³	neředit	20 %	min. 36 %	10–35 °C	12 h/vrstva

Zdroj: vlastní

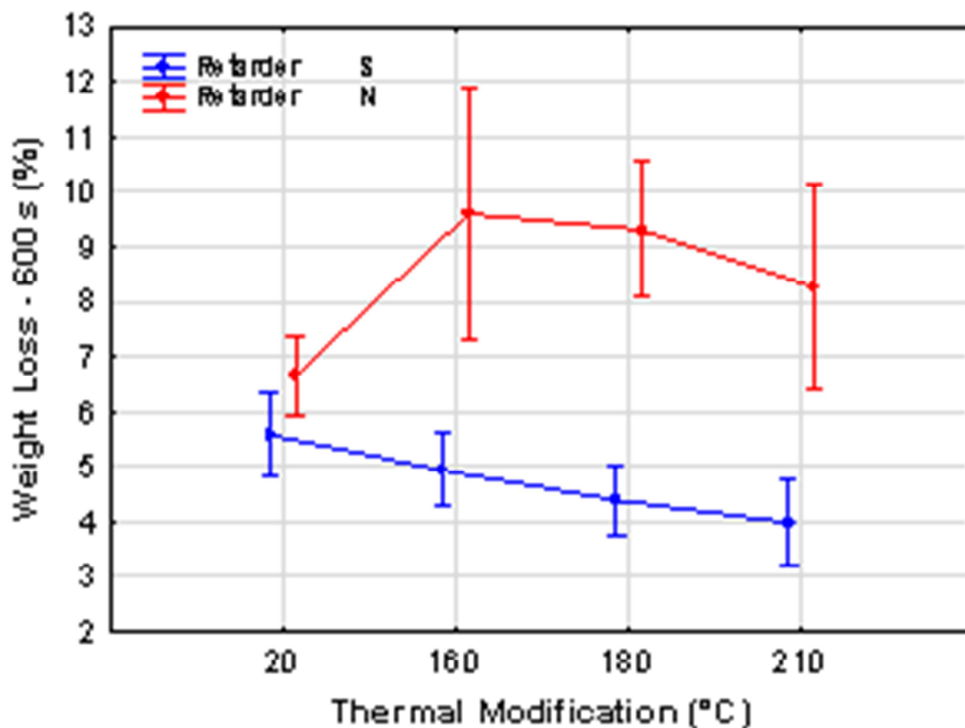
5.3 Hodnocení a výpočet

K výpočtu důležitých parametrů byly použity stejné rovnice jako v kapitole 4.1.2.1, tedy rovnice (3), (5), (6).

6 Výsledky

6.1 Úbytek hmotnosti

Na obrázku 16 je vidět vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na úbytek hmotnosti při hoření. K vysokému nárůstu úbytku hmotnosti došlo v případě termické úpravy při 160 °C bez použití retardéru. Jak je možno pozorovat v tabulce 12, všechny sledované faktory byly na hladině významnosti $P = 0,05$ statisticky velmi významné. Bližší popis vlivu materiálu na ztrátu hmotnosti popisuje tabulka 12, kde jsou jednotlivé soubory vzorků porovnány mezi sebou Duncanovým testem. Čísla v tabulce 12 a 13 pod hodnotu významnosti $P = 0,05$ jsou statisticky významnými hodnotami. Dá se tedy usoudit, že se porovnávané soubory s těmito nižšími hodnotami liší od předpokladu, že úbytek hmotnosti při hoření bude neměnný u všech souborů a sledované faktory na charakteristiky hoření nebudou mít vliv.



Obr. 16: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na úbytek hmotnosti při hoření za 600 s

Zdroj: vlastní

Tab. 12: Vliv jednotlivých faktorů na úbytek hmotnosti při hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Úbytek hmotnosti za 600 s (%)					
Intercepce	1737,454	1	1737,454	1697,643	0,000000
Retardér (R)	139,073	1	139,073	135,886	0,000000
Tepelná modifikace (TM)	9,770	3	3,257	3,182	0,037064
R x TM	23,822	3	7,941	7,759	0,000496
Chyba	32,750	32	1,023		
Příslušný model vysvětluje zhruba 84, 1 % z celkového součtu čtverců.					

Zdroj: vlastní

Tab. 13: Srovnání vlivu materiálu na ztrátu hmotnosti za 600 s pomocí Duncanova testu

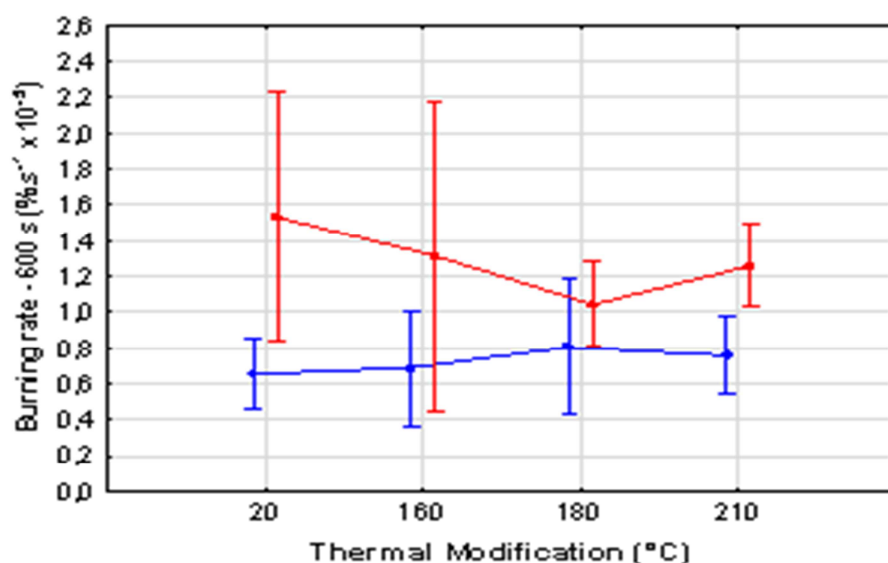
Úbytek hmotnosti za 600 s (%)										
Č.	Retardér	Termická modifikace (°C)	(1) 5,57	(2) 4,94	(3) 4,40	(4) 3,98	(5) 6,65	(6) 9,60	(7) 9,30	(8) 8,25
1	S	20		0,331	0,092	0,028	0,100	0,000	0,000	0,000
2	S	160	0,331		0,403	0,169	0,015	0,000	0,000	0,000
3	S	180	0,092	0,403		0,524	0,002	0,000	0,000	0,000
4	S	210	0,028	0,169	0,524		0,000	0,000	0,000	0,000
5	N	20	0,100	0,015	0,002	0,000		0,000	0,000	0,018
6	N	160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,645	0,054
7	N	180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,645		0,111
8	N	210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,018	0,054	0,111	

Zdroj: vlastní

6.2 Rychlost hoření

Na obrázku 17 je vidět vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na rychlost hoření. Na hladině významnosti $P = 0,05$ můžeme konstatovat, že účinek sledovaných faktorů jako jsou tepelná modifikace a retardér x tepelná modifikace, nebyly statisticky významné. Z toho vyplývá, že na rychlost hoření nemá vliv tepelná modifikace a kombinace retardéru s tepelnou modifikací.

Jako statisticky významné se projevily faktory retardéru a intercepce. Bližší popis vlivu materiálu na rychlost hoření popisuje tabulka 15, kde jsou jednotlivé soubory vzorků porovnány mezi sebou Duncanovým testem.



Obr. 17: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na rychlost hoření za 600 s

Zdroj: vlastní

Tab. 14: Vliv jednotlivých faktorů na rychlost hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Rychlost hoření - 600 s ($\% \cdot s^{-1} \times 10^{-5}$)					
Intercepce	40,44121	1	40,44121	295,9961	0,000000
Retardér (R)	3,14721	1	3,14721	23,0350	0,000036
Tepelná modifikace (TM)	0,14139	3	0,04713	0,3450	0,792991
R x TM	0,53131	3	0,17710	1,2962	0,292603
Chyba	4,37208	32	0,13663		
Příslušný model vysvětluje zhruba 46,6 % z celkového součtu čtverců.					

Zdroj: vlastní

Tab. 15: Srovnání vlivu materiálu na rychlost hoření za 600 s pomocí Duncanova testu

Rychlost hoření za 600 s (%·s ⁻¹ x 10 ⁻⁵)										
Č.	Retardér	Termická modifikace (°C)	(1) 0,652	(2) 0,688	(3) 0,804	(4) 0,756	(5) 1,530	(6) 1,314	(7) 1,042	(8) 1,258
1	S	20		0,879	0,560	0,679	0,002	0,017	0,146	0,027
2	S	160	0,879		0,645	0,773	0,003	0,023	0,176	0,035
3	S	180	0,560	0,645		0,839	0,008	0,053	0,316	0,075
4	S	210	0,679	0,773	0,839		0,005	0,038	0,257	0,057
5	N	20	0,002	0,003	0,008	0,005		0,363	0,064	0,281
6	N	160	0,017	0,023	0,053	0,038	0,363		0,281	0,812
7	N	180	0,146	0,176	0,316	0,257	0,064	0,281		0,363
8	N	210	0,027	0,035	0,075	0,057	0,281	0,812	0,363	

Zdroj: vlastní

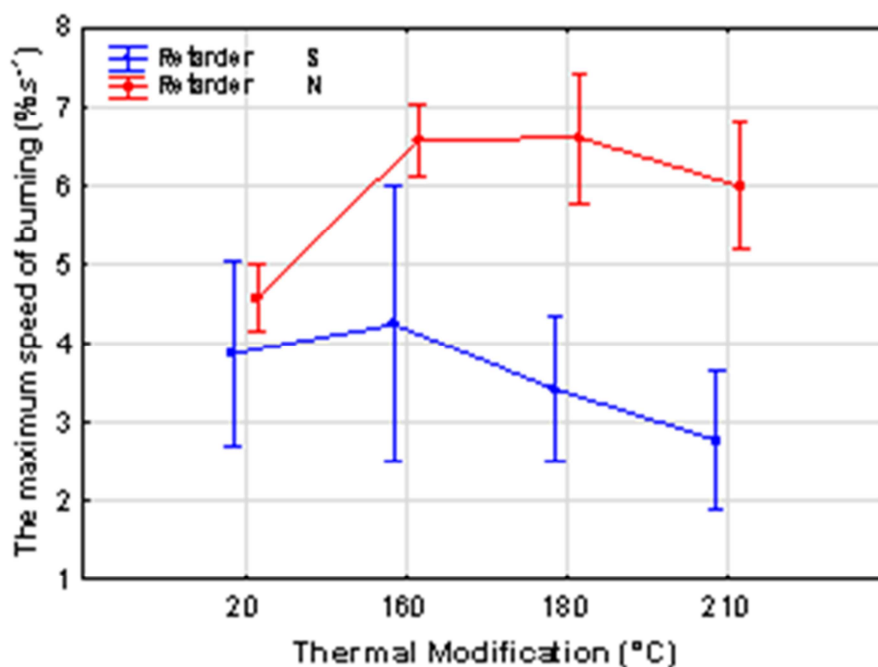
6.3 Maximální rychlost hoření

Na obrázku 18 je vidět vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na maximální rychlost hoření. Na hladině významnosti $P = 0,05$ byly všechny ze sledovaných faktorů statisticky významné. Bližší popis vlivu materiálu na maximální rychlost hoření popisuje tabulka 17, kde jsou jednotlivé soubory vzorků porovnány mezi sebou Duncanovým testem.

Tab. 16: Vliv jednotlivých faktorů na maximální rychlost hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Maximální rychlost hoření (%·s ⁻¹)					
Intercepce	902,7850	1	902,7850	1442,379	0,000000
Retardér (R)	55,2955	1	55,2955	88,346	0,000000
Tepelná modifikace (TM)	9,1581	3	3,0527	4,877	0,006637
R x TM	10,4441	3	3,4814	5,562	0,003456
Chyba	20,0288	32	0,6259		
Příslušný model vysvětluje zhruba 78,9 % z celkového součtu čtverců.					

Zdroj: vlastní



Obr. 18: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na maximální rychlost hoření

Zdroj: vlastní

Tab. 17: Srovnání vlivu materiálu na rychlost hoření za 600 s pomocí Duncanova testu

Maximální rychlost hoření (%s ⁻¹)										
Č.	Retardér	Termická modifikace (°C)	(1) 3,870	(2) 4.238	(3) 3.416	(4) 2.776	(5) 4.560	(6) 6,568	(7) 6,596	(8) 5,982
1	S	20		0,468	0,371	0,046	0,202	0,000	0,000	0,000
2	S	160	0,468		0,130	0,010	0,525	0,000	0,000	0,002
3	S	180	0,371	0,130		0,210	0,043	0,000	0,000	0,000
4	S	210	0,046	0,010	0,210		0,002	0,000	0,000	0,000
5	N	20	0,202	0,525	0,043	0,002		0,001	0,001	0,008
6	N	160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001		0,956	0,250
7	N	180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,956		0,256
8	N	210	0,000	0,002	0,000	0,000	0,008	0,250	0,256	

Zdroj: vlastní

6.4 Poměr maximální rychlosti hoření

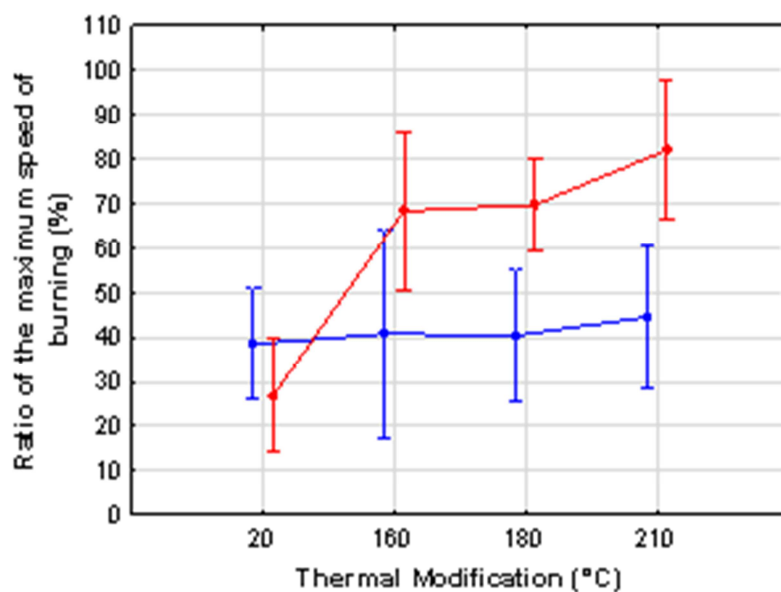
Na obrázku 19 je vidět vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na poměr maximální rychlosti hoření. Na hladině významnosti $P = 0,05$ byly všechny ze sledovaných faktorů statisticky významné. Bližší popis vlivu materiálu na poměr

maximální rychlosti hoření popisuje tabulka 19, kde jsou jednotlivé soubory vzorků porovnány mezi sebou Duncanovým testem.

Tab. 18: Vliv jednotlivých faktorů na poměr maximální rychlosti hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Poměr maximální rychlosti hoření (%)					
Intercepce	105665,8	1	105665,8	652,0197	0,000000
Retardér (R)	4262,0	1	4262,0	26,2989	0,000014
Tepelná modifikace (TM)	5149,8	3	1716,6	10,5925	0,000054
R x TM	3623,3	3	1207,8	7,4526	0,000641
Chyba	5185,9	32	162,1		
Příslušný model vysvětluje zhruba 71,5 % z celkového součtu čtverců.					

Zdroj: vlastní



Obr. 19: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na poměr maximální rychlosti hoření

Zdroj: vlastní

Tab. 19: Srovnání vlivu materiálu na poměr maximální rychlosti hoření pomocí Duncanova testu

Poměr maximální rychlosti hoření (%)										
Č.	Retardér	Termická modifikace (°C)	(1) 38,506	(2) 40,836	(3) 40,457	(4) 44,500	(5) 26,844	(6) 68,290	(7) 69,715	(8) 82,028
1	S	20		0,788	0,810	0,505	0,157	0,002	0,001	0,000
2	S	160	0,788		0,963	0,652	0,121	0,003	0,002	0,000
3	S	180	0,810	0,963		0,641	0,119	0,003	0,002	0,000
4	S	210	0,505	0,652	0,641		0,057	0,006	0,005	0,000
5	N	20	0,157	0,121	0,119	0,057		0,000	0,000	0,000
6	N	160	0,002	0,003	0,003	0,006	0,000		0,861	0,116
7	N	180	0,001	0,002	0,002	0,005	0,000	0,861		0,136
8	N	210	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,116	0,136	

Zdroj: vlastní

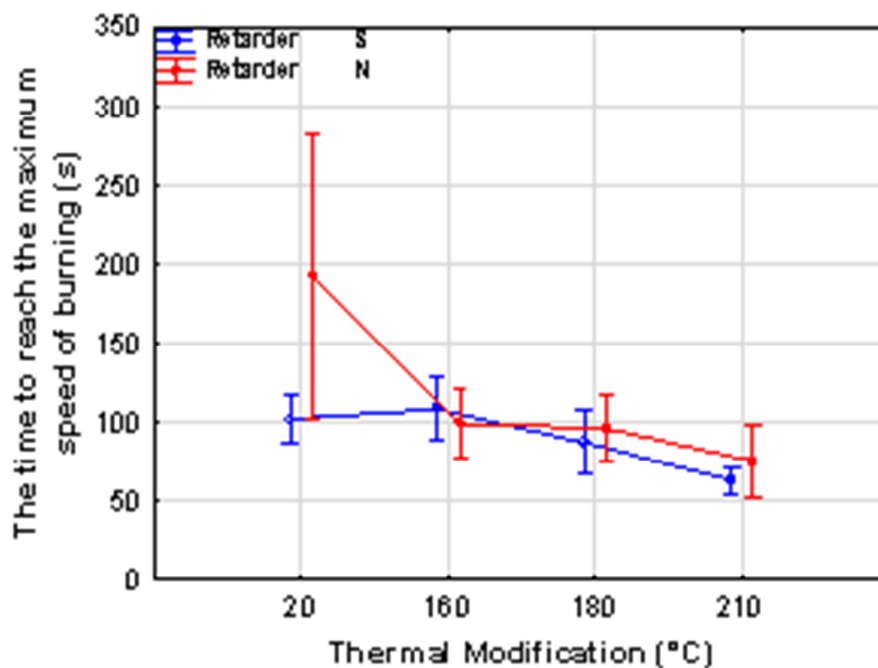
6.5 Doba k dosažení maximální rychlosti hoření

Na obrázku 20 je vidět vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření. Na hladině významnosti $P = 0,05$ byly všechny ze sledovaných faktorů statisticky významné. Bližší popis vlivu materiálu na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření popisuje tabulka 21, kde jsou jednotlivé soubory vzorků porovnány mezi sebou Duncanovým testem.

Tab. 20: Vliv jednotlivých faktorů na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Doba k dosažení maximální rychlosti hoření (s)					
Intercepce	422302,5	1	422302,5	490,6928	0,000000
Retardér (R)	6502,5	1	6502,5	7,5556	0,009751
Tepelná modifikace (TM)	32242,5	3	10747,5	12,4880	0,000014
R x TM	14512,5	3	4837,5	5,6209	0,003271
Chyba	27540,0	32	860,6		
Příslušný model vysvětluje zhruba 65,9 % z celkového součtu čtverců.					

Zdroj: vlastní



Obr. 20: Vliv tepelné modifikace a protipožární úpravy na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření

Zdroj: vlastní

Tab. 21: Srovnání vlivu materiálu na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření pomocí Duncanova testu

Doba k dosažení maximální rychlosti hoření										
Č.	Retardér	Termická modifikace (°C)	(1) 102,00	(2) 108,00	(3) 87,00	(4) 63,00	(5) 192,00	(6) 99,00	(7) 96,00	(8) 75,00
1	S	20		0,749	0,469	0,072	0,000	0,873	0,764	0,204
2	S	160	0,749		0,322	0,041	0,000	0,652	0,562	0,127
3	S	180	0,469	0,322		0,231	0,000	0,548	0,631	0,523
4	S	210	0,072	0,041	0,231		0,000	0,091	0,113	0,523
5	N	20	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
6	N	160	0,873	0,652	0,548	0,091	0,000		0,873	0,247
7	N	180	0,764	0,562	0,631	0,113	0,000	0,873		0,294
8	N	210	0,204	0,127	0,523	0,523	0,000	0,247	0,294	

Zdroj: vlastní

6.6 Charakteristiky hořlavosti

Vypočtené požární charakteristiky získané pomocí výpočtu rovnic (3), (5), (6), jsou shromážděny v tabulce 22.

Tab. 22: Průměrné hodnoty charakteristik hořlavosti

Faktory		Požární charakteristiky				
Použití retardéru	Tepelná modifikace (°C)	Úbytek hmotnosti za 600 s (%)	Rychlost hoření 600 s (%.s-1 x 10-5)	Maximální rychlost hoření (%.s-1)	Poměr maximální rychlosti hoření (%)	Doba k dosažení maximální rychlosti hoření (s)
Bez retardéru	20	7 (8,6)	1,5 (36,8)	4,6 (7,4)	15,70 (38,3)	192 (37,6)
	160	10 (19,0)	1,4 (52,3)	6,6 (5,7)	59,33 (21,1)	99 (17,3)
	180	9 (10,7)	1,0 (18,5)	6,6 (10,2)	80,93 (12,0)	96 (17,8)
	210	8 (18,1)	1,3 (14,8)	6,0 (10,8)	85,07 (15,3)	75 (24,5)
Syntetický retardér hoření	20	6 (11,0)	0,7 (23,9)	3,9 (24,4)	23,42 (26,3)	102 (12,3)
	160	5 (10,8)	0,7 (37,6)	4,2 (33,0)	37,81 (45,8)	108 (15,2)
	180	4 (11,6)	0,8 (37,7)	3,4 (21,5)	25,90 (29,3)	87 (18,9)
	210	4 (15,4)	0,8 (23,0)	2,8 (25,3)	52,00 (28,6)	63 (10,6)

Zdroj: vlastní

* Hodnoty v závorkách jsou koeficienty variací v %.

7 Výsledky a diskuze

Zkoumali se dva soubory vzorků s termickou modifikací, tedy vzorky s použitím protipožárního nátěru a vzorky bez jeho použití. Termická modifikace byla ve stupních termických modifikací 160 °C, 180 °C a 210 °C. U zkoušených vzorků se zkoumal vliv těchto termických modifikací při použití protipožárního nátěru nebo bez něj na požární charakteristiky. Sledoval se úbytek hmotnosti při hoření za 600 s, rychlost hoření, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření a doba k dosažení maximální rychlosti hoření. Zásadní bylo měření úbytku hmotnosti za 600 s v intervalech 15-ti sekund. Z výsledků jednotlivých intervalů se pomocí rovnic (3), (5), (6) vypočítali zbylé parametry jako rychlost hoření, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření a doba k dosažení maximální rychlosti hoření.

Jestli má na požární charakteristiku zkoušených vzorků vliv nějaká termická modifikace, ať při použití protipožárního nátěru nebo bez něj, se zkoumalo Fisherova F-testu na hladině významnosti $P = 0,05$. Pomocí tohoto testu se zjišťovalo, jestli sledované faktory jako intercepce, retardér, tepelná modifikace a kombinace retardéru a tepelné modifikace má vliv na jednotlivé požární charakteristiky. Dále se porovnávali jednotlivé části souborů s různým stupněm termické modifikace pomocí Duncanova testu mnohonásobného porovnávání také vztaženým k jednotlivým požárním charakteristikám.

U první zkoumané charakteristiky, úbytku hmotnosti za 600 s, se prokázal vliv u všech ze sledovaných faktorů. Porovnání rozdílů ztráty na hmotnosti za 600 s jsou tedy statisticky významné jak u vzorků s tepelnou modifikací, tak bez ní, ať s použitím retardéru nebo bez něj. To znamená, že retardér, termická modifikace i jejich interakce má prokazatelný vliv na úbytek hmotnosti. S rostoucí teplotou termické modifikace se úbytek na hmotnosti zvětšuje. Účinek retardéru byl výrazný a úbytek na hmotnosti snížil zejména u těles termicky modifikovaných. Při porovnání s výsledky úbytku hmotnosti zveřejněného, v online časopisu BioResources (Gašparík a kol., 2017), se u dubového dřeva při použití retardéru Flamgard Transparent, též projevil vliv u vzorků s tepelnou modifikací, retardérem i při jejich vzájemné interakci. Ke stejným výsledkům se došlo i v dalším výzkumu publikovaném v online časopise BioResources (Čekovská a kol., 2016) v případě dřeviny teak. Zde se ale zkoumal pouze vliv termické modifikace, nikoli retardéru.

Jako druhá zkoumaná charakteristika byla rychlost hoření. Tato charakteristika je velice důležitá, neboť velice ovlivňuje průběh požáru a jeho šíření. U této charakteristiky se neprojevil vliv od dvou sledovaných faktorů. Jsou to faktory tepelné modifikace a kombinace retardéru a tepelné modifikace. Tyto dva sledované faktory velice výstižně přesáhly hladinu významnosti $P = 0,05$. Můžeme tak usoudit, že vliv tepelné modifikace na rychlost hoření není významná. Další sledované faktory byly statisticky významné, a takže samotný retardér i intercepce mají prokazatelný vliv na rychlost hoření. Při porovnání s výsledky rychlosti hoření, zveřejněného v online časopisu BioResources (Gašparík a kol., 2017), se u dubového dřeva při použití retardéru Flamgard Transparent, projevil vliv u vzorků s retardérem a při interakci retardéru s termickou modifikací. Stejně jako v mém výzkumu se vliv termické modifikace na rychlost hoření nepotvrdil. Ke stejným výsledkům se došlo i v dalším výzkumu publikovaném v online časopise BioResources (Čekovská a kol., 2016) v případě dřeviny teak, při zkoumání vlivu termické modifikace.

Další zkoumanou charakteristikou byla maximální rychlost hoření. U této charakteristiky se projeví všechny sledované faktory statisticky. Je tedy možné tvrdit, že retardér, termická modifikace i kombinace retardéru a termické modifikace mají výrazný vliv na maximální rychlost hoření. Při porovnání s výsledky maximální rychlosti hoření, zveřejněného v online časopisu BioResources (Gašparík a kol., 2017), se u dubového dřeva při použití retardéru Flamgard Transparent, projevil vliv u vzorků s tepelnou modifikací, retardérem, nikoli ale při jejich vzájemné interakci. U výzkumu publikovaném v online časopise BioResources (Čekovská a kol., 2016) v případě dřeviny teak se vliv termické modifikace na maximální rychlost hoření nepotvrdil.

Předposlední zkoumanou charakteristikou byl poměr maximální rychlosti hoření. U této charakteristiky se taktéž jako u úbytku hmotnosti a maximální rychlosti hoření, projeví všechny ze sledovaných faktorů jako statisticky významné. Je tedy možné tvrdit, že retardér, termická modifikace i kombinace retardéru a termické modifikace mají vliv na poměr maximální rychlosti hoření. Při porovnání s výsledky ve výzkumu publikovaném v online časopise BioResources (Čekovská a kol., 2016) v případě dřeviny teak, se vliv termické modifikace na poměr maximální rychlosti hoření nepotvrdil.

Poslední zkoumanou charakteristikou byla doba k dosažení maximální rychlosti hoření. U této charakteristiky se opět jako u úbytku hmotnosti, maximální rychlosti hoření

a poměru maximální rychlosti hoření projevily jistý vliv sledovaných faktorů. Je tedy možné tvrdit, že retardér, termická modifikace i kombinace retardéru a termické modifikace mají vliv na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření. Při porovnání s výsledky doby k dosažení maximální rychlosti hoření, zveřejněného v online časopisu BioResources (Gašparík a kol., 2017), se u dubového dřeva při použití retardéru Flamgard Transparent, projevily vliv u vzorků s tepelnou modifikací, retardérem ani při jejich vzájemné interakci. V online časopise BioResources (Čekovská a kol., 2016) v případě dřeviny teak, se vliv termické modifikace také nepotvrdil.

Z celého měření tedy vyplývá, že pouze na požární charakteristiku rychlost hoření nemá vliv termická modifikace a interakce retardéru a termické modifikace. V ostatních případech nasvědčují výsledky, zhotovené pomocí statické analýzy, že je potvrzena spojitost vlivu retardéru na rychlost hoření a termické modifikace, retardéru a interakce termické modifikace a retardéru na úbytek hmotnosti, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření a dobu k dosažení maximální rychlosti hoření.

Při porovnání všech výsledků vlivů sledovaných faktorů na požární charakteristiky v mém měření, s výsledky v ostatních výzkumech je patrné, že se výsledky shodují v případě vlivu tepelné modifikace, retardéru a jejich vzájemné interakci na úbytek hmotnosti, dále pak při neprokázaném vlivu termické modifikace na rychlost hoření a při vlivu retardéru na maximální rychlost hoření. V ostatních případech se výsledky neshodují s výsledky v ostatních výzkumech. To může být dáno odlišnou dřevinou a také odlišným retardérem hoření.

8 Závěr

Práce měla za cíl ze-sumarizovat základní poznatky o vybraných požárních charakteristikách a jejich vlivu na rostlé a tepelně upravené dřevo ošetřené pomocí syntetického antipyrénu. V experimentální části došlo k porovnání vzorků dřeva z tropické dřeviny Padouk s ošetřením protipožárního nátěru v podobě Flamgardu a bez něj. Zkoumal se též vliv termické úpravy dřeva na odolnost proti ohni.

Zvolená metoda, která vycházela z již zrušené normy ČSN 73 0862/B-2 (1991), se potvrdila jako dostačující a lehce zhotovitelná. Testování zkušebních vzorků pomocí této metody je dobře dostupné a nenáročné při zachování dostačující úrovně přesnosti.

V průběhu zkoušky se se vyskytli žádné potíže a zkouška probíhala podle předem zvoleného plánu a metodiky. Zařízení a vybavení potřebné pro vykonání zkoušky bylo dostatečné a nebylo žádných nutných vylepšení. Celkových 40 vzorků bylo bez problémů použito a měřeno bez potřeby použití náhradního vzorku, který byl přidělen do každé z osmi skupin. Vyšší počet vzorků z důvodu zvýšení přesnosti se nezdá nutný, neboť průběh zkoušky byl neměnný a stálý.

Z celého měření bylo zjištěno, že pouze na požární charakteristiku rychlost hoření nemá vliv termická modifikace a interakce retardéru a termické modifikace. V ostatních případech nasvědčují výsledky, zhotovené pomocí statické analýzy, že je potvrzena spojitost vlivu retardéru na rychlost hoření a termické modifikace, retardéru a interakce termické modifikace a retardéru na úbytek hmotnosti, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření a dobu k dosažení maximální rychlosti hoření.

Seznam použité literatury

Literatura

BUČKO, J. – OSVALD, A. 1997. Požiarnotechnické vlastnosti dreva a materiálov na báze dreva. 1 vydání. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 1997. 52 s. ISBN 8022806560.

HOLAN, J. – TESAŘOVÁ, D. – VAVRČÍK, H. 2006. Dřevo v domácnosti. 1. vydání. Brno: ERA. 2006. 108 s. ISBN 80-7366-049-0.

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

KUKLÍK, P. – KUKLÍKOVÁ, A. 2010. Navrhování dřevěných konstrukcí. 1. vydání. Praha: ČKAIT. 2010. 140 s. ISBN 978-80-87093-88-7. ŠTROCH, P. 2010. Procesy hoření a výbuchů. 1. vydání. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2010. 157 s. ISBN 978-80-554-0187-4.

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

OSVALD, A. – ŠTEFKO, J. 2013. Modelový požiar dvojpodlažnej dřevostavby. 1 vydání. Ostrava: Žilinská univerzita v Žilině. 2013. 129 s. ISBN 978-80-87427-85-9.

OSVALD, A. a kol. 2009. Hodnotenie materiálov a konštrukcií pre potreby protipožiarnej ochrany. 1 vydání. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2009. 355 s. ISBN 978-80-228-2039-4.

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

REINPRECHT, L. 2001. Procesy degradácie dreva. 3. vydání. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2001. 162 s. ISBN 80-228-1070-3.

SVATONĚ, J. 2000. Ochrana dřeva. 1 vydání. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2000. 203 s. ISBN 80-7157-435-X.

Internetové články

ČEKOVSÁ, H. a kol. 2016. Tectona grandis Linn and its Fire Characteristics Affected by the Thermal Modification of Wood. bioresources.com. 2016. 2805-2817.

ČEKOVSÁ, H. a kol. 2016. Fire Resistance of Thermally Modified Spruce Wood. bioresources.com. 2016. 947-959

GAŠPARÍK, M. a kol. 2017. Flammability characteristics of thermally modified oak wood treated with fire retardant. bioresources.com. 2017.

LOKAJ, A. – VAVRUŠOVÁ, K. 2009. Požární odolnost dřevěných střešních nástaveb [online]. 25.10.2009. [20.1.2018]. <http://www.konstrukce.cz/clanek/pozarni-odolnost-drevenych-stresnich-nastaveb/>

NOVÁK, P. 2011. Tepelná modifikace dřeva - Úvod do problematiky[online]. drevostavitel.cz. 28.12.2011. [12.1.2018]. <https://www.drevostavitel.cz/clanek/tepelna-modifikace-dreva-1-dil.>

prokom.cz. Výrobní proces materiálu ThermoWood [online]. [21.12.2017]. <http://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/128-drevene-profil-y-tepelne-upravene-specialni-technologie-thermowood>

UHROVÁ, I. 2013. Šíření plamene po vrstvě prachu tvořené dřevní biomasou [online]. 11.3.2013. [14.1.2018]. <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomasou>

Normy

ČSN 73 0862/B-2. 1991. Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot.

STN EN 13501-1. 2010. Klasifikácia požiarnych charakteristík stavebných.výrobkov a prvkov stavieb. Časť 1: Klasifikácia využívajúca údaje zo skúšok reakcie na oheň.