

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Jan Jindřich

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

2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Autor práce: Bc. Jan Jindřich
Studijní program: Dřevařské inženýrství
Obor: Dřevařské inženýrství
Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Garantující pracoviště: Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Jazyk práce: Čeština

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

Metodika: 1. Úvod
2. Analýza problematiky:
- vliv stupně termické modifikace na změny požárních vlastností různých druhů termicky modifikovaných dřevin,
- vliv aplikace přírodního antipyrenu na požární vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.
3. Experimentální část
4. Měření
5. Vyhodnocení
6. Přínosy a doporučení
7. Závěr

Doporučený rozsah práce: 60

Klíčová slova: požární charakteristiky, antipyrén, thermowood

Doporučené zdroje informací:

1. Kacikova, D., Kacik, F., Cabalova, I., and Durkovic, J. (2013). "Effects of thermal treatment on chemical, mechanical, and colour traits in Norway spruce wood," *Bioresource Technology* 144, 669. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.06.110
2. Martinka, J., Chrebet, T., Král, J., and Balog, K. (2013a). "An examination of the behaviour of thermally treated spruce wood under fire conditions," *Wood Research* 58(4), 599-606.
3. Tewarson, A. (1994). "Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation," *Journal of Fire Sciences* 12(4), 329-356. DOI: 10.1177/073490419401200401
4. Xing, D., and Li, J. (2014). "Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of Larix spp. wood," *BioResources* 9(3), 4274-4287. DOI: 10.15376/biores.9.3.4274-4287
5. Yinodotlgor, N., and Kartal, S. N. (2010). "Heat modification of wood: Chemical properties and resistance to mold and decay fungi," *Forest Products Journal* 60(4), 357-361.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou 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 diplomové 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 17. 5. 2020

.....

Jan Jindřich

Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu práce panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. Za odborné vedení, trpělivost a cenné rady k mé diplomové práci.

Dále bych chtěl 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

Tato práce měla za úkol vzájemné porovnání poznatků v požární problematice rostlého dřeva a také dřeva tepelně modifikovaného, a to při aplikaci syntetického antipyrénu nebo bez jeho aplikace. Všechny tyto faktory jsme vzájemně porovnávali v experimentální části práce, kde se měl zjistit vliv termické modifikace, který nemá negativní dopad na protipožární vlastnosti dřeva. V dalších krocích se měl zjistit vliv antipyrénu, jakožto dnes velice využívaného prostředku na ochranu dřeva proti ohni. Dřevina, která byla vybrána pro tento výzkum, byla Iroko (*Milicia excelsa*), tedy exotická dřevina, která pochází z Afriky. Vzorky byly rozděleny na skupinu s ochranou syntetickým retardérem, skupinu bez ochrany a pro porovnání byly přidány vzorky s přírodním antipyrénem. Každá skupina se skládala ze 3 různých termických úprav (160 °C, 180 °C, 210 °C) a ze vzorků bez termické úpravy (20 °C).

Výsledkem měření byly vlivy faktorů na vybrané požární charakteristiky hoření a na chemickou stavbu dřeva. Při shrnutí poznatků z měření lze říct, že syntetický retardér má zcela jistě významný vliv na zlepšení protipožární odolnosti dřeva Iroko (*Milicia excelsa*). U přírodního retardéru se tato skutečnost nepotvrdila a jeho účinnost se prokázala pouze u maximální rychlosti hoření u dřeva termicky neupraveného a u dřeva termicky upraveného při 210 °C. Termická úprava neměla statistický význam u žádné požární charakteristiky, a proto nezhoršuje ani nezlepšuje protipožární vlastnosti dřeva Iroko (*Milicia excelsa*). U dat z chemického rozboru dřeva se prokázala závislost teploty na obsahu složek dřeva.

Klíčová slova: ochrana proti ohni, ThermoWood, syntetické retardéry hoření

Abstract

This work was intended to compare knowledge in the fire problem of grown wood and also heat-modified wood, when applying synthetic antipyrène or without its application. All these factors were compared with each other in the experimental part of the work, where the effect of thermal modification was to be determined, which does not have a negative impact on the fire-fighting properties of wood. In the next steps, the influence of antipyrène was to be determined, as a now highly used means of protecting wood against fire. The woody species that was selected for this research was Iroko (*Milicia excelsa*), an exotic tree that comes from Africa. The samples were divided into a group with protection of a synthetic retarder, a group without protection, and for comparison, samples were added with natural antipyrène. Each group consisted of 3 different thermal treatments (160 °C, 180 °C, 210 °C) and samples without thermal treatment (20 °C).

The measurements resulted in influences of factors on selected fire characteristics of the fire and on the chemical construction of wood. In summarizing the findings of the measurement, it can be said that the synthetic retarder certainly has a significant effect on the improvement of fire resistance of iroko wood (*Milicia excelsa*). For a natural retarder, this fact was not confirmed and its effectiveness was demonstrated only at the maximum burning rate for non-thermally untreated wood and for wood thermally treated at 210 °C. Thermal treatment was not statistically relevant for any fire characteristics and therefore does not worsen or improve the fire-fighting properties of Iroko wood (*Milicia excelsa*). Data from the wood chemical analysis showed a temperature dependence on the content of wood components.

Keywords: fire protection, ThermoWood, synthetic flame retardants

Obsah

Úvod.....	12
1 Cíl práce	14
2 Analýza poznatků k předmětné problematice	15
2.1 Faktory ovlivňující hoření dřeva.....	15
2.1.1 Vliv fyzikální stavby dřeva na proces hoření	15
2.1.2 Vliv anatomické stavby dřeva na hoření	18
2.1.2.1 Změny mikroskopické stavby dřeva při ovlivnění vysokou teplotou	21
2.1.2.2 Změny makroskopické stavby dřeva při ovlivnění vysokou teplotou	21
2.1.3 Vliv chemické stavby dřeva na proces hoření	23
2.1.3.1 Chemie dřeva.....	24
2.1.3.2 Degradace hlavních složek dřeva termickým zatížením	25
2.1.3.2.1 Celulóza.....	25
2.1.3.2.2 Hemicelulózy.....	28
2.1.3.2.3 Lignin	30
2.2 Hoření dřeva jako proces	32
2.2.1 Oxidačně-redukční děj	33
2.2.2 Etapy hoření dřeva	33
2.2.3 Požárně technické charakteristiky.....	35
2.3 Odolnost termicky modifikovaného dřeva proti ohni	37
3 Ochrana dřeva proti ohni.....	39
3.1 Konstrukční ochrana dřeva proti ohni	39
3.1.1 Zesílení průřezu	39
3.1.2 Ochranná konstrukce dřevěných prvků.....	41
3.2 Vliv retardérů hoření na ochranu dřeva.....	41
3.2.1 Požadované vlastnosti antipyrénů.....	42
3.2.2 Fyzikální účinky antipyrénů	43
3.2.2.1 Restrikce přenosu hmoty	43
3.2.2.2 Restrikce přenosu tepla	43
3.2.2.3 Ředění hořlavých plynů.....	45
3.2.3 Chemické účinky antipyrénů	45
3.2.4 Rozdělení antipyrénů podle původu.....	46
3.2.4.1 Ve vodě rozpustné anorganické zpomalovače hoření.....	46
3.2.4.2 Organické zpomalovače hoření	47
3.2.5 Způsoby aplikace antipyrénů.....	48

3.2.5.1	Povrchové ošetření dřeva antipyrénem	48
3.2.5.2	Hlubková impregnace dřeva antipyrény.....	49
4	Testování a hodnocení odolnosti dřeva proti ohni.....	50
5	Metodika	55
6	Metodika experimentální části	56
6.1	Příprava zkušebních těles	56
6.1.1	Termická modifikace vzorků.....	57
6.1.2	Chemická analýza vzorků.....	58
6.1.3	Aplikace syntetického retardéru	58
6.1.4	Aplikace přírodního retardéru.....	59
6.2	Výpočet a hodnocení naměřených výsledků	59
6.2.1	Vyhodnocení výsledků.....	61
7	Výsledky	62
7.1	Úbytek hmotnosti vlivem hoření.....	62
7.2	Rychlost hoření	63
7.3	Maximální rychlost hoření.....	65
7.4	Poměr maximální rychlosti hoření	66
7.5	Doba k dosažení maximální rychlosti hoření.....	68
7.6	Charakteristiky hoření	70
7.7	Chemická analýza	71
8	Diskuze	75
9	Závěr	78
	Seznam použité literatury	79

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vztah hořlavosti dřeva vzhledem k jeho hustotě	16
Tabulka 2: Čas vzplanutí jednotlivých dřevin podle kvality povrchu při sálavém tepelném zatížení.....	18
Tabulka 3: Elementární složení dřeva	25
Tabulka 4: Čas vzplanutí dřeva v závislosti na druhu dřeva a teplotě.....	36
Tabulka 5: Návrhové rychlosti zuhelnatění	40
Tabulka 6: Třídy reakce na oheň stavebních výrobků kromě podlahových krytin.....	52
Tabulka 7: Třídy reakce na oheň podlahových krytin	53
Tabulka 8: Hustota před a po termické modifikaci	57
Tabulka 9: Procesy termické úpravy	58
Tabulka 10: Podmínky pro nanesení Flamgardu	59
Tabulka 11: Vliv jednotlivých faktorů na úbytek hmotnosti	62
Tabulka 12: Vliv jednotlivých faktorů na rychlost hoření	64
Tabulka 13: Vliv jednotlivých faktorů na maximální rychlost hoření	65
Tabulka 14: Vliv jednotlivých faktorů na poměr maximální rychlosti hoření	67
Tabulka 15: Vliv jednotlivých faktorů na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření....	69
Tabulka 16: Průměrné hodnoty charakteristik hoření.....	71
Tabulka 17: Chemická analýza vzorků.....	72
Tabulka 18: Vliv teploty na množství jednotlivých složek dřeva	73
Tabulka 19: Spearmanova korelace mezi charakteristikami hoření a chemickým složením dřeva.....	74

Seznam obrázků

Obrázek 1: Parametry geometrického tvaru dřeva ovlivňující zapálení a hoření dřeva....	17
Obrázek 2: Prostorový nákres borovice.....	19
Obrázek 3: Prostorový nákres dřeva jasan.....	20
Obrázek 4: Degradace buněčné stěny vlivem tepla.....	21
Obrázek 5: Vliv různých teplot na zabarvení dřeva	22
Obrázek 6: Jednotlivé vrstvy vlivem termické degradace dřeva.....	23
Obrázek 7: Struktura makromolekuly celulózy	26
Obrázek 8: Přeměna jednotky celulózy na veloglukosan a degradace levoglukosanu.....	27
Obrázek 9: Struktura makromolekuly hemicelulóz	29
Obrázek 10: Schéma představy ligninu podle Nimze	31
Obrázek 11: Trojúhelník hoření.....	32
Obrázek 12: Rozměry vzorků.....	56
Obrázek 13: Vliv tepelné modifikace a retardéru na úbytek hmotnosti	63
Obrázek 14: Vliv tepelné modifikace a retardéru na rychlost hoření	64
Obrázek 15: Vliv tepelné modifikace a retardéru na maximální rychlost hoření.....	66
Obrázek 16: Vliv tepelné modifikace a retardéru na poměr maximální rychlosti hoření ..	68
Obrázek 17: Vliv tepelné modifikace a retardéru na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření	70
Obrázek 18: Změny chemického složení	72
Tabulka 19: Spearmanova korelace mezi charakteristikami hoření a chemickým složením dřeva.....	74

Úvod

Není mnoho materiálů podobných dřevu, které by člověka ovlivňovali už od počátku lidských dějin. Dřevo vždy bylo nedílnou součástí života člověka i zvířat a poskytovalo jim svými typickými vlastnostmi přežití a přispělo k vývoji lidského druhu až do dnešní doby. I když dnes existuje velké množství uměle vytvořených materiálů, materiály dřevěné lze nahradit jen těžce. Jeho použití v nábytkářství, truhlářství, stavitelství, ve výrobě hudebních nástrojů či sportovních potřeb je po celé generace prověřeno praxí a člověk se naučil tento materiál výborně využívat pro plnění svých potřeb.

Důvodem, proč tvoří dřevo tak zásadní materiál v životě lidstva je jsou jeho vlastnosti. Vlastnosti materiálů určují, zda je námi zvolený materiál vhodný pro danou činnost. U dřeva to jsou vlastnosti jako vysoká pevnost vztažená k hmotnosti, obnovitelnost, výborná dostupnost, snadná opracovatelnost bez nutnosti speciálních nástrojů, člověku příznivý vizuální vzhled, lehce zhotovitelné spoje se stejnými, či jinými materiály a v jistém smyslu použití také hořlavost, která byla jednou z prvně objevených vlastností dřeva, která pomohla našim předkům přežít. Jako u každého materiálu ale neexistují jen pozitivní vlastnosti. Vlastnosti, které negativně ovlivňují použití dřeva pro chtěný účel jsou například: schopnost snadno pohlcovat vzdušnou vlhkost neboli hygroskopicitu, nasákavost a bobtnání, špatná odolnost proti biologickým a abiotickým činitelům, heterogenita, anizotropie a také již zmiňovaná hořlavost. Když není cílem nejvíce ztrátový děj z hlediska přeměny energie, tedy použití dřeva jako paliva, spadá hoření dřeva k velice vyzdvihovaným nevýhodám, kvůli kterým jsou dřevěné stavby a jednotlivé dřevěné prvky mnohými staviteli a normami zatracovány. V posledních letech, kdy nastává snaha vrátit se od materiálů zanechávající velice významnou uhlíkovou stopu k materiálům obnovitelným, které mají příznivější dopad na přírodní prostředí, se klade veliké úsilí pro odstranění nevýhod přírodních materiálů a v tomto případě tedy dřeva.

S ohledem na doposud člověkem získané znalosti dnes již existují vhodné postupy výroby, opracování a aplikace dodatečných látek na dřevo či do dřeva, aby se negativní vlastnosti dřeva snížily, či v některých případech téměř ztratily. Toto

vylepšování vlastností dřeva postupovalo od nejjednodušších jako tvarová ochrana dřeva, nátěry či tepelná úprava(zuhelnatění) a postupně se vyvinuli v sofistikované postupy a prostředky s pomocí nichž se dřevo stává všestranným materiálem.

Tato práce se bude zejména zabývat problematikou již výše zmiňované negativní vlastnosti, a to tedy hořením a odolnosti dřeva proti ohni. Právě potlačení této vlastnosti dřeva je velice aktuální a zabývání se touto problematikou umožní zvýšit ochranu dřevěných prvků a budov před ohněm a umožní vyššímu použití dřeva ve stavitelství. Snižit zápalnost dřeva a zpomalit či zamezit hoření jsou hlavními cíli celé problematiky ochrany dřeva proti ohni. V posledních letech se věnuje veliké úsilí pro zajištění nejvyšší možné ochrany majetku a v první řadě osob při požáru. Výsledkem tohoto úsilí jsou prostředky a postupy zpracování dřeva, které značně zpomalí proces hoření a může zamezit dalšímu šíření požáru. Jedním takovým prostředkem je antipyrén neboli retardér hoření.

V práci není rozebrána jen problematika dřeva rostlého, tedy bez úprav, ale i dřeva termicky modifikovaného. Jedná se o tepelně upravené dřevo, které díky tepelné úpravě potlačuje nebo zmírňuje některé negativní vlastnosti jako malou odolnost dřeva proti abiotickým a biotickým činitelům a zároveň si dostatečně ponechá vlastnosti pozitivní. Velice časté použití tohoto upraveného dřeva v konstrukcích dalo vzniknout otázce, jak ovlivňuje tepelná modifikace protipožární odolnost dřeva.

Porovnáním požární odolnosti rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného při použití prostředku pro zvýšení odolnosti proti hoření (antipyrénu) lze získat nový pohled na použití dřeva jako hlavního stavebního materiálu.

1 Cíl práce

Prvním cílem této práce je shromáždit poznatky o vybraných charakteristikách hoření a jaký je jejich vliv na rostlé a tepelně upravené dřevo ošetřené pomocí syntetického retardéru. Díky znalostem v problematice požární odolnosti dřeva a porozumění vlivu zvýšené teploty na proces hoření je možné následně navrhnout opatření, které mají zásadní účinek při účinné ochraně dřeva, a to zejména dřevěných prvků v stavitelství.

K dalším cílům práce patří ověřit účinek syntetického retardéru hoření na vybrané požární charakteristiky dřeva a porovnat získané hodnoty se dřevem bez aplikace syntetického retardéru, ověřit účinek teploty termické modifikace na požární charakteristiky dřeva, všechny tyto výsledky statisticky vyhodnotit a porovnat je s výsledky uvedenými v jiných výzkumech. Porovnání výsledků s výsledky jiných výzkumů zaručí objektivní hodnocení, pomocí kterého lze rozhodnout, zda má použitá ochrana smysl nebo zda se její účinnost dostatečně nepotvrdila a není tedy vhodná pro ochranu dřeva před účinky požáru.

Konečné zhodnocení výsledků a posouzení přínosu pro vědu a praxi patří k posledním a podstatným cílům práce. Přínos nových poznatků pro vědu a zejména pro praktické použití je úkolem tohoto výzkumu, kde by měl pomoci v řešení problematiky požární ochrany dřeva a v budoucnu přispět k dalšímu vývoji nových ochranných opatření v této oblasti.

2 Analýza poznatků k předmětné problematice

2.1 Faktory ovlivňující hoření dřeva

Existuje mnoho faktorů ovlivňující hoření dřeva a jaký vliv budou mít zvýšení teploty na dřevní hmoty. Mezi ty nejdůležitější faktory patří:

- fyzikální stavba dřeva,
- anatomická stavba dřeva,
- a chemické složení dřeva.

Tyto faktory se nazývají primární. Dále máme faktory sekundární a ty jsou:

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

Všechny tyto složky mají bezesporu zásadní vliv na jeho charakteristickou vlastnost-hoření. Pro lepší pochopení procesu tepelné degradace dřevní hmoty a jaký vliv na dřevní hmotu má zvýšení teploty, je potřeba porozumět každému tomuto faktoru, čím jsou ovlivněny a jak nejefektivněji zpomalit proces degradace dřeva hořením (Svatoň, 2000).

2.1.1 Vliv fyzikální stavby dřeva na proces hoření

Jak je zmíněno výše, fyzikální stavba dřeva je jedním ze tří hlavních vlivů, které zásadně ovlivňují hoření dřeva a jeho průběh. Z fyzikální stavby jsou na mysli hlavně:

- hustota,
- vlhkost,
- vztah ke geometrickému tvaru,
- a kvalita povrchu.

Je známo, že dřevo s vyšší hustotou má vyšší odolnost proti ohni než dřevo hustotou nižší. Přehled nepřímé úměrnosti výše hustoty a hoření je zobrazen v tabulce č. 1. Množství energie, které je nutné na zapálení dřeva a jeho hoření je sice ovlivněno hustotou, ale samotný vliv hustoty na hoření dřeva se projeví jen když má dřevo stejné chemické složení. Když bude dřevo obsahovat například vyšší podíl celulózy, bude dané dřevo hořlavější, i za předpokladu, že má vyšší hustotu než vzorek dřeva s menší hustotou, ale s menším obsahem celulózy (Horáček, 1998).

Tabulka 1: Vztah hořlavosti dřeva vzhledem k jeho hustotě

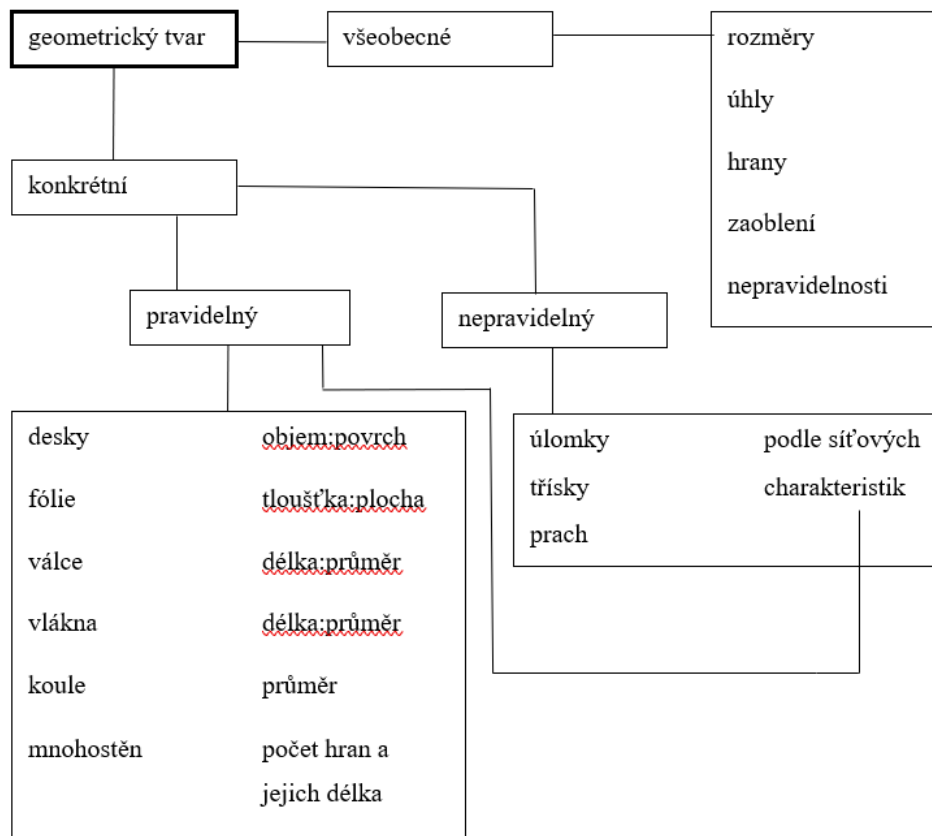
Hustota (kg/m ³)	Klasifikace	Příklad druhu dřeviny
nad 1200	dřevo velmi odolné vůči ohni	quajac
900-1200	dřevo odolné vůči ohni	bruyere, eben, zimostřáz
600-900	dřevo středně odolné	OR, HB, AK, TI, DB
400-600	dřevo málo odolné vůči ohni	SM, BO, MO, TO, VR
200-400	dřevo velmi málo odolné vůči ohni	vejmutovka
pod 200	dřevo obzvláště málo odolné vůči ohni	balza

Zdroj: Svatoň, 2000

Dalším velmi důležitým faktorem ovlivňující hoření je vlhkost dřeva. Je zřejmé, že s přibývajícím vlhkostí se odolnost dřeva proti zapálení a hoření zvyšuje. Jsou známy celkem tři druhy vody ve dřevě. Jedná se o vodu volnou, vodu vázanou a o vodu chemicky vázanou. Voda chemicky vázaná je součástí chemických sloučenin a nelze ji ze dřeva odstranit sušením. Její obsah ve dřevě je 1-2 % a vliv na hoření dřeva má zanedbatelný. Na rozdíl od vody chemicky vázané je voda vázaná spolu s vodou volnou směrodatná při hoření dřeva. Vysvětlení, proč má tak velký vliv voda vázaná a voda volná na hoření dřeva lze najít ve skutečnosti, že část tepelné energie z hoření se spotřebuje na odpaření vody volné a narušení vazeb a odpaření vody vázané. Hořlavé plyny, které vznikají při hoření jsou k navíc zředěné vzniklou vodní parou. Z tohoto důvodu vzniká nižší koncentrace hořlavých plynů a dřevo se stává hůře hořlavé. Zdálo by se, že aplikace vody může být velice vhodná pro antipyréni úpravu dřeva. Bohužel je tato vlastnost vody ve dřevě jedna z mála pozitivních vlastností a v drtivé většině voda

jak fyzikální, tak mechanické vlastnosti dřeva velmi zhoršuje (Horáček, 1998) (Jankovský, 1999).

Geometrický tvar dřevěného tělesa je také dalším významným parametrem, určující hořlavost materiálu. Jako směrodatné parametry lze uvést velikost, tvar, poměr plochy (povrchu) k objemu, podíl čelních a bočních ploch a ostré hrany. Důležitý je zejména poměr plochy k objemu. Čím vyšší je tento poměr, tím rychleji se šíří plamen a dochází k degradaci dřevěného prvku. Proto jsou malé částice dřevní hmoty jako štěpka, tříska či prach, lehce zapalitelné a neodolávají ohni tak dobře jako například dřevěný trám nebo deska. Schéma parametrů geometrických tvarů dřeva, které ovlivňují zapálení a hoření dřeva jsou zobrazeny na obrázku č. 1. Dále se díky ostrým hranám urychluje zápalnost a dochází k rychlejšímu odhořívání (Kučera, 2010).



Obrázek 1: Parametry geometrického tvaru dřeva ovlivňující zapálení a hoření dřeva

Zdroj: Osvald, 2013

Podobně jako geometrický tvar, ovlivňuje i kvalita povrchu zápalnost a hoření dřeva. Dřevo je kapilárně-pórovitý materiál a jeho hořlavost závisí také na drsnosti povrchu, kterou se vyznačuje. Dřevěný prvek s velkým množstvím zdrsnění bude vždy náchylnější na zapálení než prvek obroušený. Je to dáno hlavně tím, že kvalitní a hladký povrch odráží více tepelné energie, a tím nezbývá tolik tepelné energie k zapálení jako u zdrsněného povrchu. Tepelný zdroj je tedy méně účinný u hladkých, broušených povrchů a doba potřebná ke vzplanutí se výrazně prodlužuje. Přehled zobrazující vliv úpravy a kvality povrchu na čas vzplanutí je znázorněn v tabulce 2 (Horáček, 1998).

Tabulka 2: Čas vzplanutí jednotlivých dřevin podle kvality povrchu při sálavém tepelném zatížení

Dřevina	Čas vzplanutí (s)		
	Řezaný povrch	Hoblovaný povrch	Broušený povrch
dub	286	533	805
buk	258	677	743
smrk	374	503	583
topol	201	363	490

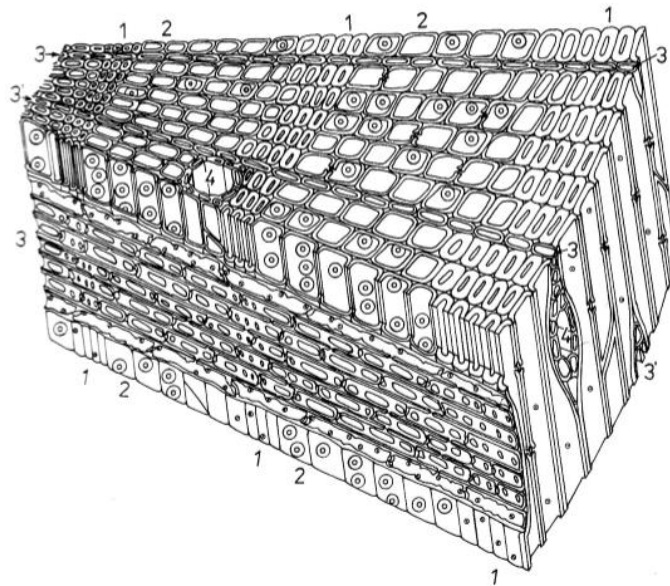
Zdroj: Osvald, 2013

2.1.2 Vliv anatomické stavby dřeva na hoření

V pořadí druhým z faktorů ovlivňující hoření je samotná anatomická stavba dřeva. Je známo, že anatomická stavba každé dřeviny je rozdílná, a tudíž může mít jiný vliv na hoření dřeva.

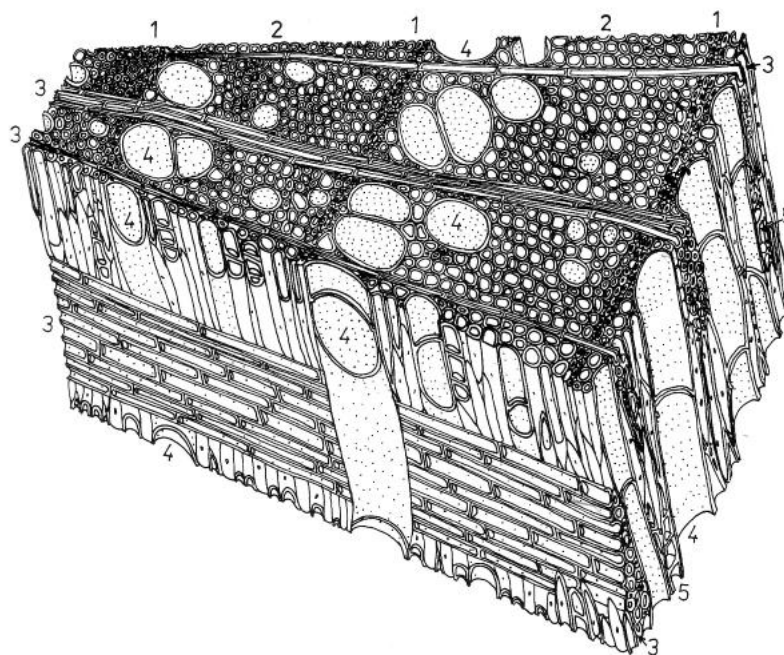
Stavba dřeva jehličnatých stromů je jednodušší než stavba dřeva listnatých stromů. Základními elementy jsou tracheidy, z kterých je složeno až 95 % objemu dřeva. Dalším základním elementem dřeva jehličnanů jsou dřevné paprsky a jejich množství ve dřevu je 5-10 %. Dále potom pryskyřičné kanálky, kterých je 0,1-1 % a dřevní parenchym, který buď je obsažen v zanedbatelném množství nebo až v 0,9 %. Zejména obsažení vyššího procenta pryskyřičných kanálků nejvíce ze všech elementů souvisí se zvýšenou hořlavostí. Pryskyřice je velice snadno hořlavou látkou a její vyšší obsah ve dřevě usnadňuje hoření.

Oproti stavbě dřeva jehličnatých stromů je stavba dřeva listnáčů složitější. Vývojově je mladší a obsahuje mnohem více anatomických elementů. Zatím co u dřeva jehličnatých dřevin zastupují jednotlivé anatomické elementy více funkcí, anatomické elementy listnatých dřevin mají funkce úzce specializované a přizpůsobené pro daný účel. Mají různou velikost, jsou více tvarově rozmanité a tvoří tak pravidelné radiální řady. Jedná se zejména o cévy-tracheje, tracheidy, libriformní vlákna, parenchymatické buňky a epitelové buňky. Srovnání odlišnosti anatomické stavby jehličnatého dřeva a dřeva listnatého je vidět na obrázku 2 a 3 (Gandelová, 2002).



Obrázek 2: Prostorový náčrt borovice: 1 - letní dřevo, 2 – jarní dřevo, 3 - dřeňový paprsek s příčnými tracheidami (podle Bertiho 1979)

Zdroj: Požgaj, 1997



Obrázek 3: Prostorový nákres dřeva jasan: 1 – hranice letokruhu, 2 – dřevní vlákna, 3 – dřeňové paprsky, 4 – cévy, 5 – dřevní parenchym (podle Bertiho, 1979)

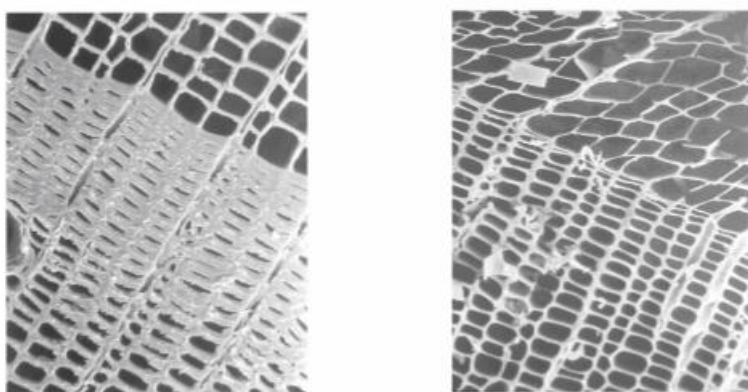
Zdroj: Požgaj, 1993

Z výše uvedeného vyplývá, že dřevo je kapilárně-pórovitý materiál a obsahuje anatomické elementy, které jsou vzájemně propojeny, aby mohli plnit pro strom životně důležité funkce (zásobní, vodivou, mechanickou, vylučovací). Právě propojitelnost anatomických elementů a povrchová drsnost jimi vzniklá, ovlivňuje hoření a rychlost degradace dřeva. Anatomická struktura ovlivňuje hoření skrz unikání zápalných plynů přes vodící elementy a kapilární systém dřeva. Přímý vliv na hoření dřeva a ovlivnění tepelných vlastností určuje pórovitost dřeva a velikost mikro- a makrokapilár. Ten má přímý dopad na transport kyslíku do dřeva a odvod plynných produktů pyrolýzy. Proto dřeva s vyšší pórovitostí podléhají termickému rozkladu snadněji (Horáček, 1998).

S pórovitostí souvisí i vliv podílu jarního a letního dřeva na hoření. Letní dřevo je výrazně tvrdší a má vyšší hustotu než dřevo jarní. Dřevěný prvek s vyšším podílem letního dřeva bude mít vyšší hustotu a tím pádem vyšší odolnost proti termické degradaci než prvek stejného druhu dřeviny s nižším podílem letního dřeva.

2.1.2.1 Změny mikroskopické stavby dřeva při ovlivnění vysokou teplotou

Každý z buněčných elementů, tedy anatomická stavba, ovlivňují proces hoření dřeva, a to zejména počáteční fázi – zapálení. Rozhodujícím faktorem je zejména chemické složení buněčných elementů, jejich geometrickým tvarem, rozměrem a počtem. Byla provedena studie (Chovanec, 1992), kde se pomocí elektronového mikroskopu zkoumal vliv vysoké teploty na anatomickou stavbu dřeva. Obrázek 4 ilustruje dopad vysoké teploty na buněčnou stěnu.



Obrázek 4: Degradace buněčné stěny vlivem tepla (vlevo – před termickou degradací, vpravo – po termické degradaci)

Zdroj: Chovanec, 1992

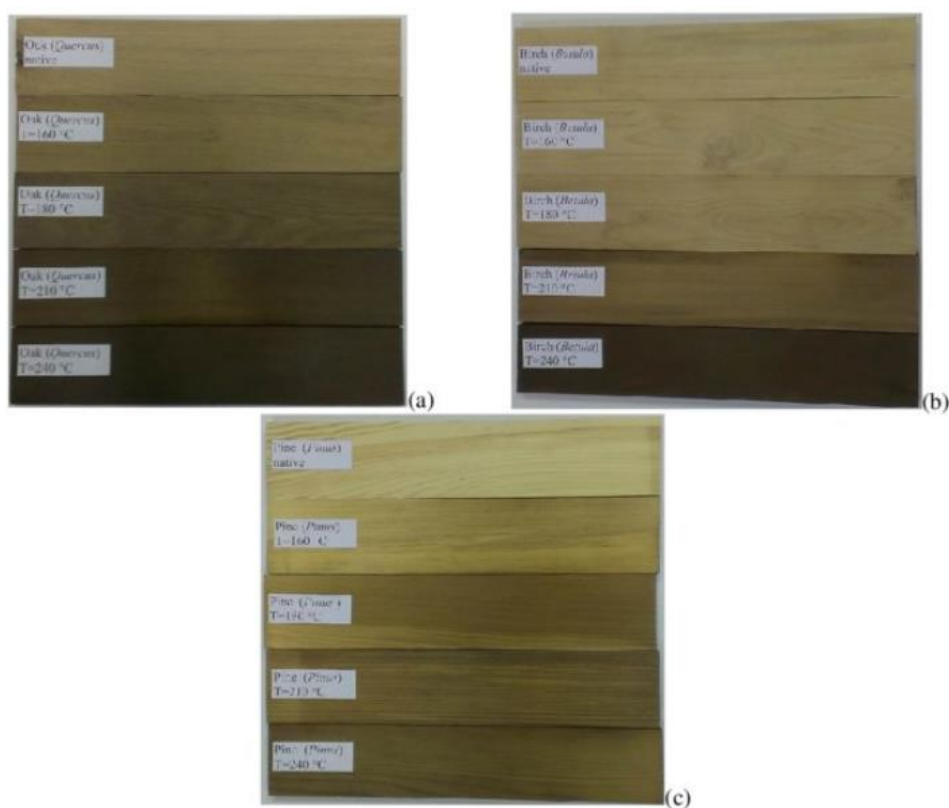
Na uvedeném obrázku 4 je vidět hranice letokruhu u smrkového dřeva před termickou degradací a po ní. Na první pohled je patrné, že po tepelné degradaci došlo ke ztenčení buňkové stěny u dřeva tepelně degradovaného. To je dáno zejména degradací hemicelulózy a celulózy v sekundární vrstvě buněčné stěny. Proti tomu primární stěna a střední lamela, která je lignifikovaná, je tvarově stálá i po tepelné degradaci i když je jen těsně před zpopelněním (Osvald, Štefko, 2013).

2.1.2.2 Změny makroskopické stavby dřeva při ovlivnění vysokou teplotou

Prvním jevem, který nastává při namáhání dřeva vysokou teplotou jsou výsušné trhliny. Děje se tak, při velmi vysokých teplotách za velmi krátký čas nebo v případě, že je dřevo namáhané ne až tak vysokými teplotami. Tyto trhliny zvětšují povrch a

degradace se stává rychlejší a intenzivnější. Hodnocení takovéto změny je náročné a těžko měřitelné.

Další změnou, kterou lze pozorovat pouhým okem je změna barvy tepelně degradovaného tělesa. Vliv teploty na změnu barvy různých druhů dřeva lze pozorovat z výzkumu (Barcík a kol., 2015) na obrázku 5.

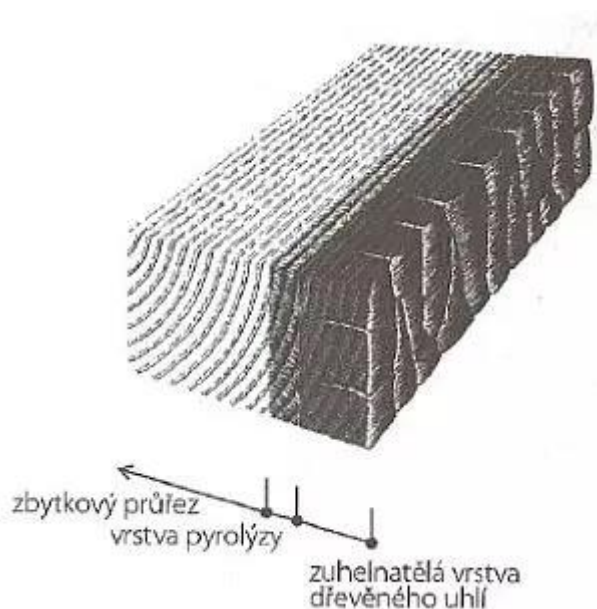


Obrázek 5: Vliv různých teplot na zabarvení dřeva a) dubu, b) břízy c) borovice při 160°C, 180°C, 210°C, 240°

Zdroj: Barcík a kol., 2015

Z obrázku 5 je zřejmé, že s přibývajícím teplotou barva dřeva postupně tmavne. V případě stále se zvedající teploty by postupem času došlo k zhuštění. Změna barvy je tedy závislá na rychlosti ohřevu a míře teploty ohřevu. Děje se tak díky odbourávání polysacharidické složky, tedy hemicelulózy a celulózy. Zuhelnatělá vrstva se se zvyšující se teplotou a časem ztlušťuje, praská a nakonec odlupuje. Jelikož je zuhelnatělá vrstva velice špatným vodičem tepla, zpomaluje hoření a degradaci zbytku dřevní hmoty. To je dáno hlavně chemickým složením uhlí, které se skládá ze 80 % z uhlíku a je velice pórovité. Vzniklá zuhelnatělá vrstva brání přístupu kyslíku do zbylé

celistvé části průřezu a termická degradace se zpomaluje. Této charakteristice se říká autoretardační vlastnost dřeva a v praxi se sní počítá. Na obrázku 6 jsou vidět jednotlivé vrstvy termické degradace dřeva (Barber, Gerard, 2015).



Obrázek 6: Jednotlivé vrstvy vlivem termické degradace dřeva

Zdroj: Straka a kol., 2013

Výzkum (Huntierová, 1995), který zkoumal vliv změny teploty v průřezu nosníku na požární odolnost, objevil, že pod ochovělou vrstvou a vrstvou tepelně degradovanou (11-15 mm) je zbylá vrstva zcela neporušená. To bylo prokázáno nejen z barvy dřeva, ale také z následně provedených zkoušek, které byly vykonány. V projektech proto lze navrhovat konstrukce s vyšší požární odolností a počítat s tímto faktem (Osvald, Štefko, 2013).

2.1.3 Vliv chemické stavby dřeva na proces hoření

Ze všech vlivů na proces hoření, které jsou uvedeny výše, je tím nejpodstatnějším právě vliv chemické stavby, neboť hlavně z podstaty chemické stavby

a složení dřeva se stává dřevo hořícím materiálem. Pro dobré pochopení problematiky je důležité znát chemii dřeva. To znamená, z jakých složek se skládá a proč různé poměry hlavních složek mohou ovlivňovat hoření dřeva.

2.1.3.1 Chemie dřeva

Dřevo je přírodní materiál, který se skládá z komplexů chemických látek z největší části z makromolekulového charakteru. I když je dřevo považováno za živý materiál kvůli výskytu živých pletiv, a především podílem živých parenchymatických buněk s živou cytoplazmou, po zpracování a zejména sušení a skladování lze počítat už jen s mrtvým dřevem. Dřevo takto zpracované je složeno přibližně z 50 % celulózu a druhých 50 % tvoří hemicelulózy, lignin a ostatní doprovodné látky.

Právě podíl těchto základních chemických složek je velice důležitý pro sledování vlivu chemické stavby na hoření. Vliv mají i vzájemné vazby mezi těmito chemickými látkami, jejich rozložení v buněčné stěně a variabilita v jednotlivých částech dřevěného prvku (Čunderlík, 2009).

Při analýze jednotlivých prvků dřeva se podstatné rozdíly mezi jeho částmi a složkami stírají. Při pohledu na tabulku 3 je vidět elementární složení dřeva různých druhů dřevin. Z údajů vyplývá, že suché dřevo obsahuje 49,4 % uhlíku, 6,2 % vodíku, 44,2 % kyslíku a 1 % dusíku. Dřevo obsahuje i další prvky, ale jejich obsah ve většině případů nedosahuje ani 1 %. Výjimku tvoří exotické dřeviny s obsahem až 3,5 % ostatních látek. Jedná se hlavně o draslík, vápník, hořčík a křemík (popel). Je možné si všimnout vysokého obsahu kyslíku, který naznačuje, že jednotlivé složky dřeva jsou již částečně zevnitř oxidovány. Uhlíky jednotlivých složek mají vyšší oxidační čísla než elementární uhlík. To prozrazuje, že využitelný energetický obsah dřeva jako výhřevnost nebo spalné teplo je nižší než výhřevnost uhlí (Jankovský a kol, 1999).

Tabulka 3: Elementární složení dřeva (%)

dřevina	C	H	O	N	dřevina	C	H	O	N
<i>Quercus.rubra.</i>	49,4	6,1	44,5	1,28	<i>Populus alba</i>	49,7	6,3	44,0	0,97
<i>Fagus sylv.</i>	48,5	6,3	45,2	0,93	<i>Tilia sp.</i>	49,4	6,9	43,7	0,96
<i>Betula pubes.</i>	48,6	6,4	45,0	1,12	<i>Pyrus com.</i>	48,9	6,4	43,4	0,91
<i>Acer rubrum</i>	49,8	6,3	43,9	1,05	<i>Picea abies</i>	51,4	6,1	41,6	0,94
<i>Ulmus amer.</i>	50,2	6,4	43,4	1,0	<i>Pinus sylv.</i>	49,6	6,4	44,0	0,89
<i>Fraxinus sp.</i>	49,4	6,1	44,5	1,0	<i>Larix dec.</i>	50,1	6,3	43,6	1,11

Zdroj: Jankovský a kol., 1999

Elementární složení dřeva je důležité zejména kvůli výpočtu množství tepla, které získáme spálením hmotnosti (kg) nebo objemové jednotky (m³) dřeva (Čunderlík, 2009).

Když se oddělí od dřevní hmoty voda, zbyde sušina, která se dělí na hlavní (majoritní) složky a doprovodné (minoritní) složky. Hlavními majoritními složkami jsou sacharidické složky (celulóza, hemicelulóza) a aromatické složky (lignin). Mezi minoritní složky patří složky organické (třísloviny, terpenické látky, N-látky, lipidy) a anorganické složky (Jankovský a kol, 1999).

2.1.3.2 Degradace hlavních složek dřeva termickým zatížením

Termická degradace je děj, kdy dochází k rozkladu složek dřeva. Pomocí tepelné energie dochází k chemické reakci. Dochází tak k narušení hlavních složek dřeva, a to celulóze hemicelulóze a ligninu (Osvald, Štefko, 2013). Podrobnější vysvětlení tohoto děje u jednotlivých složek je popsáno v následujících kapitolách.

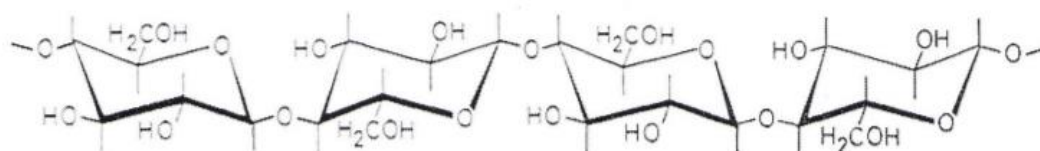
2.1.3.2.1 Celulóza

Jedná se o nejrozšířenější organickou sloučeninu biosféry, která je typickým polysacharidem se stavební funkcí. Její obsah se stanovuje přibližně na 35-56 % a

jehličnaté dřeviny mají vyšší zastoupení celulózy (46-56 %) než je tomu u listnáčů (41-48 %). Tím, že je z celulózy tvořena většina částí buněčných stěn rostlinných buněk, v tom případě i dřeva, je celulóza zásadním biopolymerem na zemském povrchu.

Čistá celulóza je tvořené vláknitými makromolekulami a ty vznikají spojením zbytků D – glukózy (β -D glukopyranózy) glykozidovými vazbami (vazbami mezi prvním a čtvrtým uhlíkem druhé molekuly). Po sjednocení dvou molekul β – D glukopyranózy se tvoří disacharid celobióza. Právě celobióza je základní stavební jednotkou celulózy (Gandelová, 2002).

V živých meristematických pletivech se pomocí složitých biochemických reakcí a růstových stimulátorů, syntetizují dlouhé makromolekuly. Jejich struktura je znázorněna na obrázku 7.



Obrázek 7: Struktura makromolekuly celulózy

Zdroj: Čunderlík, 2009

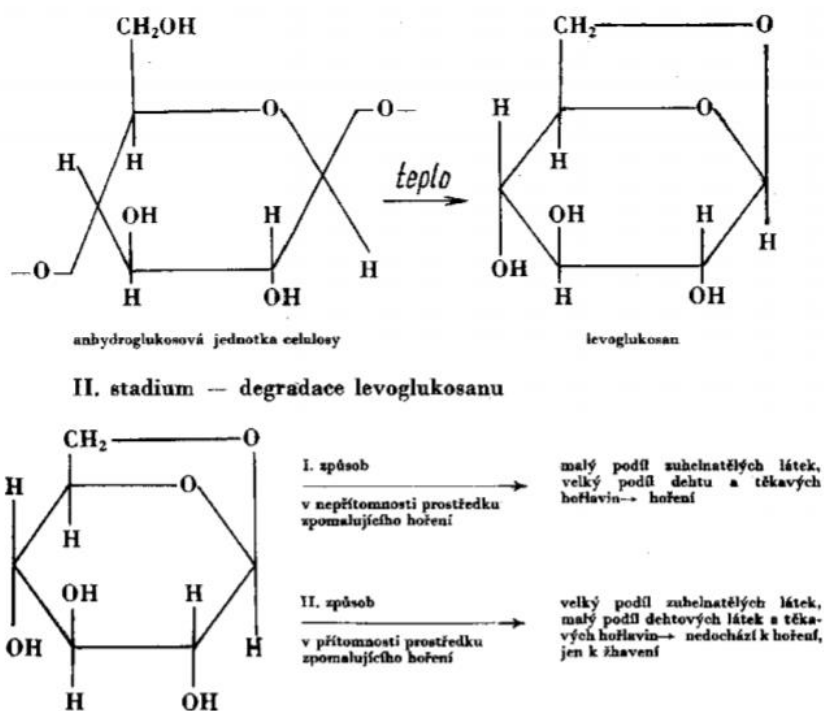
Jedná se o polymerní proces jejíž výsledkem se stává, že glukózové molekuly jsou vzájemně spojené přes glykozidické vazby C-O-C při vytvoření vysokopolymerní celulózy. Takováto vytvořená vazba je velmi pevná a tím je makromolekula celulózy výjimečně tahově pevná. S porovnáním s glykozidickými vazbami makromolekul celulózy jsou boční vazby tvořené vodíkovými vazbami podstatně slabší. To, jaký počet glukózových stavebních jednotek, tedy stupeň polymerace, bude daný produkt mít, rozhoduje, jaký typ se v daném produktu nachází. Například čistá celulóza má polymerační stupeň 3500–12000, čištěná 1000–3000 a dřevo 600–1500 (Čunderlík, 2009).

Makromolekuly celulózy se v rostlinných pletivech spojují do svazků celulózových vláken a ty se dále seskupují v mycely nebo krystality. Mycely jsou uspořádány do vláken, které se nazývají fibrily a dosahují délky 100 až 250 nm při

průměru 0,3 až 0,5 nm. V ligninové a hemicelulózové matrici jsou umístěny tyto vlákna a společně tvoří buněčné stěny.

Celulóza se dělí na dvě základní formy, a to krystalická celulóza a amorfní celulóza. Krystalická forma celulózy tvoří 70 % a vyniká velikou pevností v tahu. Zbytek, tedy 30 %, tvoří druhá forma celulózy – amorfní. Krystalická celulóza je kromě své pevnosti v tahu i značně odolná proti rozpouštědlům na rozdíl od amorfní části, která je díky velmi slabému propojení vodíkovými můstky lehce rozpustná rozpouštědly, je reaktivní a snadno podléhá kyselé hydrolyze a degradaci. V této amorfní části dřevo bobtná a účinky bobtnání zesilňují zásadité roztoky (Jankovský, 1999).

Jako základní složka dřeva má celulóza bezesporu určitý vliv na termickou degradaci. Do teploty 250 °C je celulóza termicky stálá, ale při teplotách nad 300 °C nastává k narušení vazeb v základním řetězci. Koncový článek celulózy se změní na levoglukózan a ten se posléze přemění na hořlavé plyny. Přeměna jednotky celulózy na levoglukózan a dále degradaci levoglukózanu popisuje obrázek 8 (Osvald, Štefko, 2013).



Obrázek 8: Přeměna jednotky celulózy na levoglukózan a degradace levoglukosanu

Levoglukózan je látkou, která má význam jako surovina pro chemické syntézy, ale i pro objasnění procesu hoření celulóзовých materiálů. Celulóza je materiálem vysoce hořlavým a předpokládá se, že právě tvorba levoglukózanu jako primárního produktu při hoření to způsobuje. Nicméně levoglukózan sám o sobě s kyslíkem nereaguje, ale jen s produkty jeho termického rozkladu (sekundární produkty) (Jankovský, 1999).

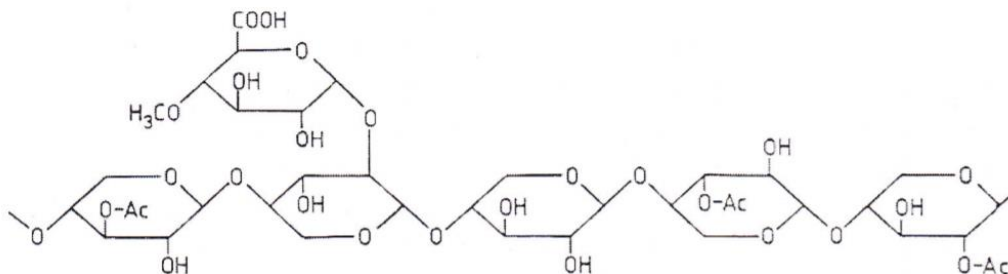
2.1.3.2.2 Hemicelulózy

Hemicelulózy spadají stejně jako celulóza pod polysacharidy. Na rozdíl od celulózy se liší zejména svým složením. Obsahují totiž kromě D-glukózy jako stavební jednotku různé druhy monosacharidů jako např. D-xylózu, D-galaktózu, L-arabinózu nebo uronové kyseliny. Dále se liší nižším stupněm polymerace a z toho plynoucí nižší relativní molekulovou hmotností a nízkým podílem krystalické části. Jejich polymerační stupeň dosahuje hodnot v rozmezí 100-200. Hemicelulózy formují jakousi tmelící vrstvu mezi celulóзовými řetězcovými makromolekulami a váže se na ně lignin. Tím vytváří jednotlivé stěny buněk anatomických elementů dřeva. Oproti celulóze jsou i lehčeji extrahovatelné roztoky zředěných alkálií a lze je vcelku lehce hydrolyzovat zředěnými kyselinami.

Dřevo obsahuje 15-35 % hemicelulóz a jejich obsah je nižší v jehličnatých dřevích než ve dřevě listnáčů (Gandelová, 2002).

Hemicelulózy dělíme podle základních stavebních jednotek. Rozdělujeme je na xylány, manány a galaktány, u kterých je hlavní složkou anhydrid daného sacharidu. Jak je uvedeno výše, obsah hemicelulóz je proměnlivý s druhem dřeva, ale mění se i skladba. Například nejdůležitějšími hemicelulózami listnáčů jsou xylan, kde se pohybují obsahem až 35 %. Jsou složeny z β -D xylopyranózových jednotek. Polymerační stupeň se pohybuje v rozmezí 100-200. Méně významné jsou manany, které jsou obsaženy ve dřevě listnáčů s podílem 3-5 % a jejich polymerační stupeň kolísá okolo 60-70. Oproti tomu jsou ale navíc se vyskytující jednotkou ve dřevě jehličnatých dřevin, kde jsou zastoupeny obsahem 20-25 %. Obsah xylanů ve dřevě jehličnatých dřevin je kolem 10-

15 %, ale ve srovnání s xylany listnáčů mají nižší polymerační stupeň (70-130). Xylany



Obrázek 9: Struktura makromolekuly hemicelulóz

Zdroj: Čunderlík, 2009

se lépe izolují ze dřeva, snadněji hydrolyzují a jsou chemicky méně stálé.

Z hlavních stavebních jednotek jsou galaktany nejméně objevující se jednotkou. Jejich obsah tvoří pouze 0,5-3 % s výjimkou modřínu s obsahem 10-20 % a reakčního dřeva. Galaktany jsou rozpustné ve vodě silně rozvětvenými řetězci. D-galaktóza tvoří hlavní řetězec a podle druhu dřevin se vyskytují různé jednotky v bočních řetězcích (Čunderlík, 2009).

Podobně jako celulóza se termicky rozkládají i hemicelulózy, s rozdílem, že v amorfním stavu poskytují méně anhydridů a rozkladné reakce probíhají intenzivněji. Jejich termický rozklad se pohybuje v celkem širokém rozpětí a to 170-240 °C. Výraznější exotermický efekt nastává nad teplotou 200 °C. Ze všech tří složek dřeva se jedná o složku nejdříve degradující při vystavení teplotnímu namáhání (Osvald, Štefko, 2013).

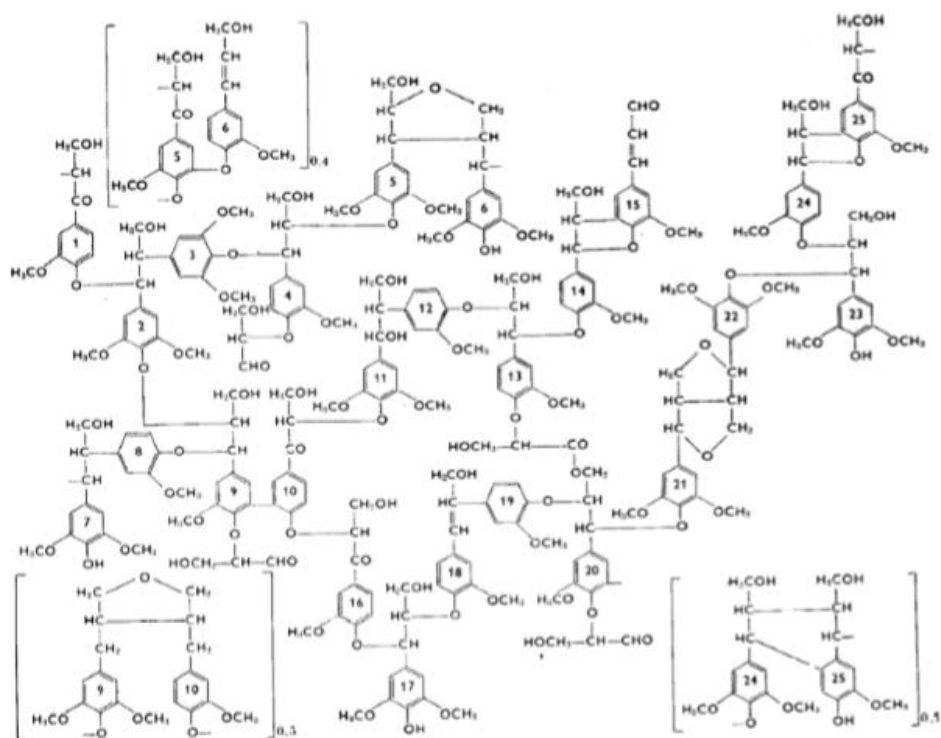
Degradace hemicelulóz začíná deacetylací a vznikající kyselina octová působí jako katalyzátor depolymerizačních reakcí, přičemž dále urychluje rozklad polysacharidů. Tato skutečnost vede k tomu, že vzniká formaldehyd, 2-furaldehyd a další aldehydy (Velková a kol., 2018).

2.1.3.2.3 Lignin

V pořadí třetí z hlavních složek dřeva je lignin. Spolu s celulózou tvoří nejdůležitější polymery ve dřevě a jejich obsah je i největší. Obsah ligninu ve dřevě je v rozmezí 15-35 %. Zatím co dřevo listnatých dřevin obsahuje lignin v rozmezí 15-30 %, ve dřevě jehličnatých dřevin lze najít větší množství, 25-35 %. Lignin se u obou druhů dřevin neliší jen množstvím, ale i různou stavbou. Každá část stromu se liší obsahem ligninu a nejvíce je zastoupen v kůře. Makromolekuly ligninu jsou prostorově rozložené a se svojí trojrozměrnou strukturou mohou velmi dobře vyplňovat prostory mezi fibrilami polysacharidů v buněčné stěně. Buněčné stěny, které obsahují polysacharidy, impregnuje a je s nimi spojen chemickými vazbami a tvoří lignopolysacharidové komplexy. Díky těmto dějům dodává dřevu pevnost. Lignin se nejvíce ukládá do střední lamely a primární buněčné stěny anatomických elementů dřeva. Ukládání ligninu do stěn rostlinných buněk se nazývá lignifikace nebo též dřevnatění (Gandelová, 2002).

Lignin má termoplastickou vlastnost a velmi absorbuje světlo. I když základní výzkumy ligninu byly aplikované již v letech 1890, nelze dodnes tvrdit, že jsou zcela známy vlastnosti ligninu ve formě, v které je obsažen v pletivech rostlin. Po chemické stránce jde vedle celulózy a hemicelulóz o ojedinělý případ, neboť je o ligninu vyprávěno jako o sloučenině, které nebyly nikdy vidět v jejich přirozeném a nepoškozeném stavu. V chemii se proto pracuje s preparáty v různém stupni čistoty, které jsou izolovány z dřevní hmoty (izolovaný lignin).

Detaily stavby ligninu se zjišťovali postupně z jeho rozkladných produktů. V dnešní době se předpokládá asi 70-130 základních jednotek, které se spojují v podjednotku, která se stává základním prvkem makromolekuly ligninu. Takovýchto podjednotek se nachází v makromolekule až 500. Na rozdíl od celulóz je vytvořená trojrozměrná, amorfní makromolekula ligninu nestejněměrná a netvoří pravidelnou strukturu složenou z opakujících se jednotek. Lignin je tak nejsložitějším přírodním polymerem a jeho struktura není proto dodnes přesně známá. Modely ligninu, které jsou do dnešní doby uváděné, představují jeho průměrnou strukturu. Schéma ligninu podle představy Nimze je zobrazeno na obrázku 10.



Obrázek 10: Schéma představy ligninu podle Nimze

Zdroj: Jankovský a kol., 1999

Po termické stránce je lignin nejstabilnější složkou dřeva. Jeho trojrozměrná benzenoidní struktura je velice odolná vůči působení tepla. Kolem teploty 100-180 °C se lignin nejdříve plastifikuje (endotermická reakce) a k výraznějšímu exotermickému rozkladu dochází až při teplotách 300-400 °C (Osvald, Štefko, 2013).

Při vyšších teplotách se chemicky mění hlavně díky termooxidačním reakcím, které mají polymerizační a kondenzační charakter (exotermická fáze). V rozmezí teplot 150-300 °C se štěpí vazby C-C v alkylové části fenylypropanových jednotek ligninu. U teplot 300 až 600 °C se štěpí vazby C-C v málo aktivovaných alkylových částech ligninu a také vazby C-C alkyl-akrylové vazby, rozkládá se fenylykumaranový kruh a atomy uhlíku tvoří v zuhelnatělé vnější vrstvě grafitovou strukturu (Reinprecht, 2008).

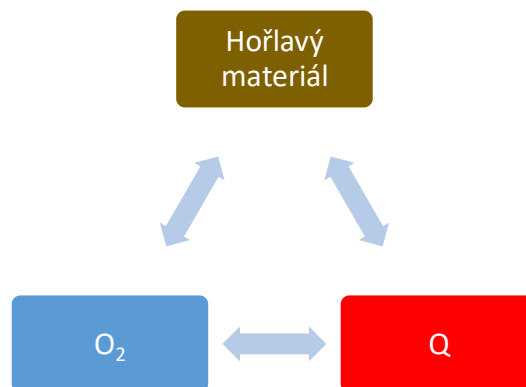
2.2 Hoření dřeva jako proces

Jak bylo popsáno výše, dřevo je díky své anatomické, fyzikální a zejména chemické stavbě snadno zapalitelné a hořlavé. Vysoký obsah energie ve dřevě nahromaděný v čase fotosyntézy a následný vliv endotermických reakcí, kdy probíhá přeměna glukózy na polysacharidy a lignin, se obtížně uvolňuje vlivem tepelných aktivací. Vznik dřeva a zapálení a hoření jsou vlastně protichůdné procesy, kdy se složky s vysokým obsahem energie postupně štěpí na hořlavé plyny a ty se ty se štěpí dále na oxid uhličitý a vodu (Reinprecht, 2008).

Hlavním předpokladem k zapálení a hoření je potřeba tří složek:

- oxidovadla (kyslík O_2),
- materiálu, který má nahromaděnou potenciální energii,
- a aktivační energie (Q), ve formě plamenného nebo sálavého zdroje.

Tomuto souboru se říká trojúhelník hoření, viz. Obrázek 11.



Obrázek 11: Trojúhelník hoření

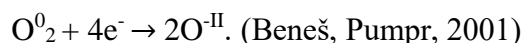
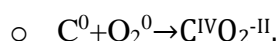
Zdroj: vlastní

2.2.1 Oxidačně-redukční děj

Pojem hoření je chápán jako rychlá chemická reakce, kterou provází uvolňování tepla a světelné záření. V drtivé většině případů se jedná o oxidační reakci a projevuje se plamenem, ale zóna svítivosti plamene může však někdy chybět. Oxidační činidlo je tedy základním předpokladem pro vznik hoření. Když se jedná o požár, je nejčastějším oxidačním činidlem vzdušný kyslík. Jsou známe ale i další vlastnosti a účinky oxidačních činidel. Ty jsou známe hlavně v anorganické chemii a nejčastěji se lze setkat s bezkyslíkatým oxidačním prostředkem v podobě chloru (Novotný, Sedláček, 1980).

Znalosti o stavbě atomu jsou důležitým předpokladem při objasnění oxidačně redukčních dějů. Když dochází k oxidaci určitého prvku, nastávají změny v jeho elektronovém obalu. K oxidaci prvku nastává, když ze svého obalu odevzdává elektrony jinému prvku za současného nárůstu kladné hodnoty oxidačního čísla. Takováto reakce je reakcí redoxní. Tuto reakci lze ukázat v následujícím popisu hoření:

- oxidace-oxidační číslo prvku se zvětšuje, atom ztrácí elektron,
- redukce-oxidační číslo prvku se zmenšuje, prvek přijímá elektron,
- atomy nebo molekuly prvků mají pokaždé oxidační číslo nula (Fe^0 , C^0 , O_2^0 , H_2^0),



2.2.2 Etapy hoření dřeva

Proces hoření dřeva a dřevěných materiálů probíhá ve třech etapách a to iniciace (zapálení dřeva), propagace (šíření plamene, termický rozklad), terminace (žhavení až útlum žhavení).

Iniciace neboli zapálení dřeva, nastává, když se v blízkosti dřeva nachází iniciační tepelný zdroj s dostatečným příkonem na jednotku plochy. Tento děj musím být samozřejmě za přítomnosti oxidovadla, nejčastěji kyslíku. Číselně lze vyjádřit podíl příkonu na plochu jako $P/A=10^4 \text{ W/m}^2$. Iniciační příkon je závislý na typu energetického zdroje. Při sálavém energetickém zdroji musí být iniciační výkon zhruba o 100 až 150 % větší než při plamenném zdroji. Teplota, která je nutná k zapálení dřeva se pohybuje od 200 do 400 °C. Teplota zapálení je dána několika faktory jako jsou:

- vlhkost dřeva – jak je uvedeno v předešlých kapitolách, vlhké nebo mokré dřevo se zapaluje výrazně hůře než dřevo suché. Důvodem je vniklá vodní pára, která ředí hořlavé plyny,
- poměr povrchu dřeva k objemu – s větším povrchem k objemu dřeva je dřevo mnohem lehčeji zapalitelné,
- čas ohřevu – teplota potřebná k zapálení se snižuje s prodlužováním času ohřevu. Bylo vyzkoušeno, že při sálavém ohřevu dřeva na teplotu 200 °C nastalo vznícení až za 12-40 min, zatímco při 300 °C nastalo vznícení už po 1,5-3 minutách,
- hustotou dřeva – s přibývajícím hustotou je dřevo hůře zapalitelné. S hustotou roste tepelná vodivost dřeva a odvod tepla z povrchu směrem dovnitř je intenzivnější. Dále klesá pórovitost a s ní související obsah kyslíku ve dřevě,
- drsnost povrchu dřeva – s větší kontaktní plochou, a tedy vyšší drsností dojde k zapálení mnohem snadněji než u dřeva s hladkým povrchem.

Propagace je proces, kdy dochází k šíření plamene a samovolnému hoření dřeva. Jak u iniciace, tak i u propagace, rychlost procesu závisí na vlhkosti, hustotě a drsnosti povrchu. Zatímco iniciace závisí na vnějších podmínkách, propagace závisí na vnitřních podmínkách ve dřevě, a i na vnějších podmínkách v jeho okolí. S rozvinutím požáru přebírá dřevo úlohu zdroje hoření. Stává se materiálem, z kterého se exotermickými reakcemi vytváří další teplo, které je potřebné pro rozvoj požáru. Dřevo postupně odhořívá a na jeho povrchu se začíná formovat zuhelnatělá vrstva dřevěného uhlí. Tloušťku zuhelnatělé vrstvy lze vypočítat vzorcem (1):

$$d = \beta \cdot \tau \quad (1)$$

- kde: d – tloušťka zuhelnatělé vrstvy (mm)
 β – rychlost odhořívání dřeva (mm/min)
 τ – čas (min)

Terminace, známá také pod pojmem žhavení dřeva, je poslední etapou hoření dřeva. Jedná se o rozklad zuhelnatělé vrstvy dřeva. Její tepelná a teplotní vodivost je velmi nízká a vlastní pouze 20 % z původní hustoty dřeva. Již se dále nepřeměňuje na hořlavé organické plyny, ale oxiduje se na oxid uhelnatý a posléze na nehořlavý oxid uhličitý za vzniku tepla (Reinprecht, 2008).

2.2.3 Požárně technické charakteristiky

Jako nejčastěji používanými charakteristikami pro posouzení chování požárních vlastností dřeva odvozených z jeho fyzikálních a chemických vlastností, lze uvést:

- teplotu vzplanutí,
- teplotu hoření
- teplotu zápalnosti,
- výhřevnost dřeva.

Teplota vzplanutí, je nejnižší teplotou, při které hořlavá látka za běžného tlaku vytvoří takové množství hořlavých par, aby při krátkodobém přiblížení zkušebního plamene směs par se vzduchem vzplála a opět zhasla. Teplota vzplanutí se vyjadřuje v °C a za běžný tlak se považuje hodnota 101 325 Pa (SPBI, 1999).

Teplota vzplanutí se nachází u dřeva v rozmezí 180-275 °C a silně závisí na druhu dřeva, hustotě, chemickém složení a vlhkosti dřeva. Čas vzplanutí dřeva v závislosti na teplotě u různých druhů dřevin popisuje tabulka 4.

Tabulka 4: Čas vzplanutí dřeva v závislosti na druhu dřeva a teplotě

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

Zdroj: Horáček, 1998

Teplotou hoření se rozumí teplota, při které dřevo po oddálení vnějšího zdroje plamene nadále samovolně hoří. U dřeva se pohybuje v rozmezí teplot 260-290 °C.

Teplotou vznícení je označována taková teplota, při které se plyny, které vnikly termickým rozkladem, samovolně vznítí. Teplota vznícení se pohybuje v mezi teplotou 330 °C a 520 °C.

Množství tepla získaného spálením 1 kg dřeva se nazývá výhřevnost. Jinak řečeno, je to množství energie, které vznikne oxidací jednotkového množství hořlavých látek při působení zvýšené teploty. Dřevní substance je u všech druhů dřevin téměř konstantní, a proto se výhřevnost dřeva pohybuje v rozmezí 18-19 MJ.kg⁻¹. Dřeva bohatá na hořlavé doprovodné látky a zejména pryskyřice, mohou mít tuto hodnotu vyšší. Hodnota výhřevnosti je většinou zjišťována kalorimetricky. Výhřevnost je závislá na vlhkosti dřeva, která se projevuje výparným teplem na odpaření vody ze dřeva (Horáček, 1998).

Závislost výhřevnosti na vlhkosti lze vyjádřit podle rovnice (2):

$$H = \frac{H_0 - 30w}{100 + w} \quad (2)$$

kde je: H – výhřevnost ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 H_0 – vlastní výhřevnost ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
 W – vlhkost dřeva (%)

2.3 Odolnost termicky modifikovaného dřeva proti ohni

Požární odolnost termicky upraveného dřeva se vzdáleně neliší od požární odolnosti neupraveného dřeva. Zhoršení protipožární odolnosti může nastat při úpravě dřeva metodou OHT, při které zvýšený obsah oleje ve dřevu může zhoršit odolnost dřevu proti ohni (Reinprecht, 2008).

V souvislosti problematiky vlivu termické modifikace na protipožární odolnost se již vytvořilo několik výzkumů, které potvrzují dostatečnou, ne-li vyšší odolnost termicky upraveného dřeva proti účinkům ohně.

Mezi nejzajímavější patří výzkumy se věnují problematice požární odolnosti, a to zejména smrku. Konkrétně je testovaná požární odolnost termicky modifikovaného smrkového. Jedná se o měření a porovnání odolnosti smrkového ve stupních tepelných modifikací 160 °C, 180 °C a 210 °C a dřeva rostlého bez tepelné modifikace. Smrk byl použit hlavně z důvodu nejpoužívanějšího dřeva na našem trhu a pro jeho dobrou termickou úpravu.

Zkoumá se zejména vliv tepelné modifikace na protipožární vlastnosti dřeva a jaký vliv mají různé stupně tepelné modifikace. Tepelně modifikované dřevo má díky svým příznivým vlastnostem, jako je odolnost vůči biotickým činitelům, povětrnostním vlivům a zlepšení fyzikálních vlastností, velkou oblibu při různých konstrukčních řešeních staveb. Z tohoto důvodu je důležitá i protipožární ochrana dřeva. Vzhledem k termické úpravě dřeva vyplívá otázka, zda termická úprava nezhoršuje protipožární odolnost dřeva a nepodporuje jeho hoření.

Pro komplexnost výzkumů a porovnání byl také použit na jednu část vzorků syntetický antipyrén Flamgard transparent. Jedná se o retardér hoření, který je možné

použit i na pohledové části dřevěných prvků. Při kontaktu s ohněm vytváří na povrchu izolační pěnovou vrstvu a tím oddaluje degradaci dřeva.

Oba výzkumy nasvědčují tomu, že termická úprava nezhoršuje protipožární vlastnosti dřeva, a naopak s použitím syntetických antipyrénů může zvýšit ochranu dřevěného prvku před účinky požáru. Vzhledem k dalším příznivým vlastnostem termicky upraveného dřeva oproti dřevu neupravenému, je jeho použití velmi výhodné hlavně v nenosných konstrukčních prvcích staveb, které jsou součástí jak interiéru stavby, tak exteriéru (Čekovská a kol., 2016) (Makovická, Gaff, 2018).

3 Ochrana dřeva proti ohni

Veškeré kapitoly, které jsou doposud uvedeny, se věnují procesu hoření, charakteristikám hoření a co vše může ovlivňovat termickou degradaci dřeva. Nadále se téma bude ubírat směrem ochrany dřeva proti výše zmíněným vlivům, tedy proti termické degradaci. Jednou z hlavních nevýhod dřeva jako stavebního materiálu, je jeho hořlavost a snadná zápalnost. Předejetí zapálení, zpomalení hoření a zahrnutí této vlastnosti dřeva do výpočtů návrhu dřevěných konstrukcí je možné udělat i z takto, na první pohled požárně nebezpečného materiálu, materiál požárně bezpečný a výhodný.

Pod ochranou dřeva pro ti ohni si lze představit to, jak lze co nejefektivněji zvýšit protipožární odolnost dřeva a dřevěných konstrukcí. Obsahem této problematiky je, jak dosáhnout chtěného, projektem a normou předepsaného stupně požární bezpečnosti a splňoval funkční, ekonomické, ekologické požadavky spolu s dlouhou životností ochrany.

3.1 Konstrukční ochrana dřeva proti ohni

U konstrukční ochrany dřeva proti ohni jsou dvě možnosti, jak chránit dřevo nebo zpomalit proces hoření a předejít úplnému zničení dřevěné konstrukce. Lze buď zesílit průřez dřevěných prvků nebo lze vytvořit na nosném dřevěném prvku ochranou konstrukci, která není tvořena z hořlavých materiálů.

3.1.1 Zesílení průřezu

Zesílení průřezu dřevěného prvku se dosahuje předimenzováním průřezu. Tímto způsobem se oddálí porušení únosnosti dřevěné konstrukce a získá se čas potřebný pro zamezení další degradace. Důležitým faktorem je v tomto případě kvalita povrchu, kdy

je hladký, nerozpraskaný povrch mnohem odolnější než povrch hrubý s trhlinami (Dejmal, 1995).

Míra předimenzování dřevěného prvku závisí na rychlosti a hloubce zuhelnatění. Hloubka zuhelnatění je vzdálenost mezi vnějším povrchem původního prvku a čarou zuhelnatění, která se nachází mezi zuhelnatělou vrstvou a vrstvou nepoškozeného dřeva. Poloha čáry zuhelnatění se nachází v místě izoterm 300 °C, což platí u většiny jehličnatých a listnatých dřevin (Kuklík, 2010).

Návrhová hloubka zuhelnatění se určí ze vztahu (3):

$$d = \beta_0 \cdot t \quad (3)$$

kde d – návrhová hloubka zuhelnatění
 β_0 – návrhová rychlost zuhelnatění
 t – doba vystavení účinkům požáru

Návrhové rychlosti zuhelnatění pro rostlé dřevo a lepené lamelové dřevo jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 5: Návrhové rychlosti zuhelnatění

	β_0 (mm/min)
Dřevo jehličnatých dřevin	0,65
Lepené lamelové dřevo $\rho \geq 350 \text{ kg/m}^3$	
Rostlé dřevo $\rho \geq 350 \text{ kg/m}^3$	
Dřevo listnatých dřevin	0,5
Rostlé nebo lepené lamelové dřevo $\rho \geq 290 \text{ kg/m}^3$	
Rostlé nebo lepené lamelové dřevo $\rho \geq 450 \text{ kg/m}^3$	

Zdroj: Kuklík, 2010

3.1.2 Ochranná konstrukce dřevěných prvků

Pod pojmem ochranných konstrukcí jsou namysli nejčastěji deskové prvky, které chrání dřevěný prvek před účinkem požáru. Desky je možno buďto nalepit na nosný prvek, nebo desky tvoří samostatnou konstrukci. Při použití desek jako obkladu stavebních nosných prvků se musí počítat s vyšší hmotností a je nutné respektovat fyzikálně mechanické vlastnosti desky a prvku, které spolu spolupůsobí. Na rozdíl od samostatných konstrukcí ale nezmenšují vnitřní prostor a lze přiznat přirozený tvar konstrukce. Samostatná konstrukce s protipožárními desek musím mít vlastní nosnou podkonstrukci, na kterou lze upevnit desky. Tím se vytvoří samostatné konstrukční prvky jako stěny, příčky, stropy nebo podhledy.

Důležitou roli při zatížení desek požárem hraje zejména celistvost, která určuje celkovou odolnost protipožární ochrany. Při porušení této podmínky se totiž zcela změní parametry konstrukce a nastává degradace nosné konstrukce.

Protipožární desky lze rozdělit na desky z anorganických a organických hmot a desky kombinované. V praxi se nejvíce používají desky z anorganických hmot, díky jejich nevýraznějšímu protipožárnímu účinku. Ty se dělí na desky cementové, sádrové a vápenocementové (Vašátko, 2009).

3.2 Vliv retardérů hoření na ochranu dřeva

Retardéry hoření, také označované jako antipyrény, jsou látky zvyšující odolnost dřeva vůči ohni, ale i jiných hořlavých materiálů. Jelikož se dřevo řadí k materiálům lehce až středně hořlavým, lze pomocí retardéru zvýšit protipožární odolnost až na rovinu materiálů těžce hořlavých. Retardéry hoření usměrňují přenosové a reakční děje ve dřevě, díky čemuž oddalují jeho termickou degradaci a vznícení (Reinprecht, 2008).

Retardéry mají sice vlastnost zvýšit odolnost proti ohni, ale nelze počítat s absolutní nehořlavostí dřeva. Hořlavost tedy nelze vyloučit ale pouze oddálit a snížit

termický rozpad za předpokladu že byl zvolen vhodný druh antipyrénu a vhodným způsobem byla provedena aplikace.

Oddálení zápalnosti a retardovat proces hoření je možné těmito způsoby (Svatoň, 2000):

- podpoření zuhelnatění vrstvy,
- zamezení kontaktu kyslíku se dřevem,
- zabránění žhavení zuhelnatělé vrstvy,
- vhodnou povrchovou úpravou a úpravou spojů.

3.2.1 Požadované vlastnosti antipyrénů

Žádný antipyrén nemůže splňovat všechny požadavky a z tohoto důvodu je na místě vybrat ten nevíce vyhovující prostředek na námi zvolený účel. Požadované vlastnosti antipyrénů lze rozdělit na základní a méně zásadní vlastnosti, tedy vedlejší:

- základní požadavky (Svatoň, 2000):
 - zhášení ohně,
 - odolnost vůči ohni,
 - redukce hoření,
 - ukončení žhavení zuhelnatělé vrstvy po zhašení ohně.
- vedlejší požadavky:
 - životnost,
 - dobrá adheze nebo impregnace do dřeva,
 - víceúčelové použití,
 - jednoduchost přípravy,
 - bez korozivních účinků,
 - bez snižování mechanických vlastností dřeva,

- možnost dodatečné úpravy na retardér,
- bez snižování pevnosti lepených spojů,
- nízké náklady,
- bez škodlivých účinků na člověka.

3.2.2 Fyzikální účinky antipyrénů

Hoření je proces, u kterého dochází k přenosu hmoty a tepla. A právě s regulací a omezením těchto procesů a ředěním hořlavých plynů se zbývají fyzikální účinky retardérů (Reinprecht, 2008).

3.2.2.1 Restrikce přenosu hmoty

Látky fungují na principu omezením přístupu kyslíku a hořlavých plynů do dřeva tím, že na povrchu dřeva vytváří vrstvu, která má nevhodné vlastnosti pro hoření dřeva.

Vrstva na vnějším povrchu – je tvořena tavitelnými látkami na bázi vodního skla nebo intumescentními látkami – pěnotvornými látkami.

Vrstva na vnitřním povrchu – vrstva je tvořena látkami typu boritanů. Ty se ve formě vodných roztoků dostávají hlouběji do dřeva a tam při zvýšených teplotách tvoří tavitelnou glazuru.

V obou případech dochází ke snížení přenosu kyslíku a hořlavých plynů do dřeva (Reinprecht, 2008).

3.2.2.2 Restrikce přenosu tepla

K omezení přenosu tepla dochází tehdy, když na vnějším povrchu dřeva dochází k obalení celistvými tepelně-izolačními vrstvami neboli vrstvami intumescenčními.

Tepelně izolační vrstvy jsou tvořeny z nátěrů nebo folií, které se zaktivují po tepelném namáhání. K aktivaci dochází při teplotách nad 150 °C a na povrchu dřeva se začíná vytvářet nehořlavá tepelně-izolační vrstva tvořena mikroporézní pěnovou strukturou. Odolnost takovéto vrstvy může dosahovat až 30 minut. Pěnotvorná vrstva se nanáší zejména pomocí vodného roztoku v tenké vrstvě. V případě zahřátí nad výše uvedenou teplotu se tenká vrstva napění a vznikne tuhá, kyslíku nepropustná vrstva, izolující zdroj ohně od povrchu dřeva. Důležitou vlastností pro pěnotvorné retardéry je expanzní faktor. Ten určuje poměr napěněné vrstvy ku tloušťce původní vrstvy. V případě expanzního faktoru 1:50 se vytvoří z vrstvy 0,2 mm tloušťka vrstvy 10 mm. Při nánosu vrstvy o vydatnosti 300-500 g/m² se může počítat s tloušťkou pěnové vrstvy 5 mm, která určuje minimální ochranou vrstvu (Reinprecht, 2008).

V pěnotvorných nátěrech se nachází tyto složky:

- makromolekulové látky – vyznačují se vlastností přecházet do taveniny a po zpěnění se vytvoří tuhý uhlíkový skelet. Látky, které mají tuto vlastnost jsou zejména polyalkoholy, polyvinylacetáty a jejich polymery, polyamidy, polyuretany, polyaminofosfáty a epoxidy,
- zpěňovadla – tyto látky vytváří při teplotách nad 105 °C a v přítomnosti katalizátorů nehořlavé plyny. Jsou to zejména látky jako močovina, melamin, metylmočovina, dikyandiamid a hexametylentetramin,
- katalyzátory – jejich úkol je regulovat tenkou vrstvu protipožárního nátěru, když dochází k přeměně na tuhou pěnu. K tomu dojde, když vzniká tavenina, která má za úkol rozkládat zpěňovadla na nehořlavé plyny, které posléze napěňují viskózní taveninu polymeru. Vzápětí, kdy se napění makromolekulová látka, dochází k přeměně na uhlíkový povrch. Zástupce takovéto látky je kyselina fosforečná,
- přísady –pozměňují vlastnosti látky pro zlepšení stability, přilnavosti, barevnosti, světelné stálosti. Mohou například zvýšit i pevnost pěny a tuhost.

Dále mohou zvyšovat odolnost nátěru vůči povětrnostním podmínkám a biologickým škůdcům (Reinprecht, 2008).

3.2.2.3 Ředění hořlavých plynů

Při termickém rozkladu dřeva se uvolňují hořlavé plyny. Nehořlavé plyny uvolňující se z retardérů narušují kontakt molekul hořlavých plynů s kyslíkem. Jedná se zejména o vodní páru, oxid uhličitý či amoniak. Produkce reakčního tepla se snižuje díky přesunu hořlavých plynů od povrchu dřeva až za zónu aktivní pyrolýzy difuzí a tokem. Jelikož se k povrchu dostává méně aktivačního tepla stává se požár méně rozšířený. (Reinprecht, 2008).

3.2.3 Chemické účinky antipyrénů

Chemické účinky antipyrénů jsou složené z chemických reakcí, které snižují množství kyslíku těsné blízkosti povrchu dřeva a ve dřevě. Dále potom regulují rozklad dřeva na uhlíkový povrch, aby docházelo k negativnímu ovlivnění tvorby hořlavých plynů.

Látky, které jsou nápomocné a potřebné v redukci procesu hoření, jsou látky schopné regulovat množství kyslíku v oblasti aktivní pyrolýzy, tím že na sebe váží kyslík. Jsou to zejména látky jako halogenidy, nejčastěji chloridy a bromidy.

Katalická dehydratace polysacharidů neboli také karbonizace dřeva, se řadí k endotermickým reakcím. Z polysacharidů jako je celulóza a hemicelulóza se uvolňuje voda a v tom případě jsou polysacharidy obzvláště náchylnější na karbonizaci. Snižování rozkladu dřeva na hořlavé plyny se výrazně sníží proces termického rozkladu. Hlavními zástupci jsou v první řadě látky na bázi kyseliny fosforečné a také například kyseliny sírové či chlór vodíkové (Reinprecht, 2008).

3.2.4 Rozdělení antipyrénů podle původu

V dnešní době je nejrozšířenějším ochranným prostředkem proti ohni antipyrén ve formě vodních roztoků anorganických sloučenin. V podstatně menší míře se lze potkat s formou organických sloučenin. Do jaké míry antipyrén ochrání dřevo závisí jak na způsobu použití, tak na způsobu nanášení. Neméně důležitým aspektem je také vhodný výběr typu antipyrénu. Nelze očekávat, že jediná látka uspokojí veškeré požadavky a z tohoto důvodu dochází k vývoji co nejvhodnějších směsí pro chtěné použití. Pouze v takovém případě je možné propojit nejlepší vlastnosti jednotlivých látek a tím zabezpečit účinný a funkční prostředek. Jak je uvedeno výše, antipyrény se rozdělují na ve vodě rozpustné anorganické a organické.

3.2.4.1 Ve vodě rozpustné anorganické zpomalovače hoření

Amonné soli. V první řadě se využívá fosforečnan amonný, síran amonný, bromid amonný, chlorid amonný a tetrátboritan amonný. Fosforečnany mají dobrou vlastnost chránit dřevo už při aplikaci nátěrem. Látky jako síran a ostatní soli se vyznačují dobrými ochrannými vlastnostmi pouze v případě aplikace tlakovou impregnací. Veškeré amonné soli se vyznačují korozivním účinkem na kovové předměty, ale účinně snižují zhavení dřevěného uhlí.

Fosforečnany. Kromě již uvedených sloučenin se v praxi používá také velice účinný terciální fosforečnan draselný. Stejně jako amonné soli se také vyznačuje korozivní účinky a dále je hygroskopický.

Sírany. Mezi nejúčinnější látky tohoto druhu se řadí síran amonný a také síran hlinitý, síran hlinito-draselný, síran hořečnatý. Jako významnou nevýhodu síranu hlinitého a síranu hlinito-draselného se jeví jeho velice lehká zvětrávající struktura a tím ztrácí účinnost. Síran hořečnatý má hygroskopickou vlastnost. Všechny uvedené sírany se vyznačují korozivními účinky.

Chloridy a bromidy. Látky jako chlorid hořečnatý, chlorid zinečnatý, chlorid vápenatý, chlorid hlinitý, chlorid amonný a bromid amonný patří mezi nejvíce známe chloridy a bromidy. Pro co nejvyšší účinnost se používá tlaková impregnace.

Uhličítany. Nejvíce používané a účinné uhličítany jsou uhličítan draselný a uhličítan sodný. V porovnání s uhličítanem sodným je uhličítan draselný účinný již při aplikaci nátěrem. Uhličítan sodný je potřeba pro vyhovující účinnost aplikovat tlakovou impregnací. Uhličítan draselný má hygroskopickou vlastnost a obě látky se vyznačují korozivními účinky.

Boritany. S použitím tlakové impregnace je možné dosáhnout značné odolnosti. Takto aplikovaná látka se vyznačuje jak odolností proti hoření, tak i odolností proti houbám a plísním. Mezi účinné látky řadíme kyselinu boritou, tetraboritan amonný a tetraboritan sodný. Tyto látky se mohou sice lehce vylouhovat vodou, ale nemají korozivní účinky.

Vodní sklo. Jde o koloidní roztok křemičitanu sodného anebo křemičitanu draselného. Jeho použití je ve většině případů ve formě nátěru nebo postřiku a jeho aplikace impregnací je nevhodná. Účinek vodního skla je v rozpustnosti při vysokých teplotách a vytvoření ochranné vrstvy na povrchu materiálu. Jelikož se jedná o velice účinný ochranný prostředek s dobrou aplikací, jeho použití je v praxi velice značné. Jako jeho negativní vlastnost lze vyzdvihnout zvětrávání v krátkém časovém intervalu. Vrstva vodního skla se zvětráváním narušuje a odlupuje se. Této negativní vlastnosti lze předejít obnovou nátěru a zamezení aplikace ve více vlhkém prostředí (Horský, 1987).

3.2.4.2 Organické zpomalovače hoření

Citráty. Jako účinné látky lze považovat soli kyseliny citrónové. Jelikož mají tyto látky malou účinnost a ekonomicky nejsou zcela výhodné, používají se jen v malé míře.

Umělé živice. Jedná se o močovino-formaldehydové sloučeniny. Látky jako andiaminové živice se vyznačují dobrou účinností proti ohni. Jelikož jejich použití není samostatné používá se jako složka primární nebo sekundární fosforečnan amonný. Použité příměsi jsou nápomocny živícím v ochraně dřeva tvorbou pěnové vrstvy. Z tohoto důvodu se nepoužívají pro hloubkové impregnace.

Ostatní látky, které mají organický původ se pro ochranu dřeva ve větší míře používají kvůli špatné ochraně. Mohou se v malé míře používat na příměsi a pro doplnění množství dalších, výše uvedených retardérů (Horský, 1987).

3.2.5 Způsoby aplikace antipyrénů

Účinný antipyrén by byl v kontextu použití na ochranu dřeva k ničemu bez správné aplikace na dřevěný povrch či do něj. Jak již bylo uvedeno, každá ochranná látka má jiné požadavky na aplikaci. Zatím co jednu látku lze aplikovat nátěrem, další by byla v případě takové aplikace nepoužitelná. Dřevo vystavené v exteriéru a je tedy vystaveno nepříznivým atmosférickým podmínkám se nejvhodněji ošetří obzvláště hloubkovou impregnací. Dřevo vystavené v interiéru lze ošetřit povrchovou ochranou (Horský, 1987).

Zpomalovače hoření se používají především kapalné formě. Mezi základní způsoby nanášení patří povrchové nanášení a hloubková impregnace (Reiprecht, 2008).

3.2.5.1 Povrchové ošetření dřeva antipyrénem

K hlavním povrchovým ošetřením dřeva patří nátěr, nástřik, nános nebo ponor či krátkodobé máčení. Tyto způsoby aplikace jsou založeny na využití difúze a kapilárního tlaku. Vzhledem k této skutečnosti je tloušťka ošetřené vrstvy pouze do 2 mm. (Reinprecht, 2008).

Ochranný prostředek se nanáší v několika ucelených, stejnoměrných vrstvách. U stříkání je důležitá vzdálenost trysek vůči ošetřovanému dřevu, která by měla být ve stejné vzdálenosti po celý čas procesu nanášení. Metoda stříkání je velice rychlá a ochranná látka je aplikována i do hůře dostupných míst dřevěného prvku. Z tohoto důvodu je aplikace stříkáním velice vhodná pro dřevěné konstrukce a komplexnější konstrukční prvky (Horský, 1987).

Posledními metodami z povrchového nanášení ochranných látek je krátkodobé máčení či ponor. Aplikovat lze také v několika vrstvách, ale může docházet k tvorbě

vzduchových bublinek, které mohou narušovat celistvost ošetřeného povrchu. Ponor a máčněním je rozdílné v délce aplikace ochranné látky. Zatím co ponor trvá jen několik sekund až minut, máčnění trvá 15 minut a více (Reinprecht, 2008).

3.2.5.2 Hloubková impregnace dřeva antipyrény

Tlaková impregnace ochranné látky patří mezi průmyslové metody impregnace dřeva. Jako největší výhodu tlakové impregnace lze považovat vysokou míru hloubky ošetřeného dřeva. U správné hloubkové impregnace pronikne ochranná látka bělí až k jádru. U dřeviny s dobrou impregnovatelností se může proimpregnovat i jádro. Metoda je založena na zvýšení tlaku (zpravidla 0,8 MPa) nebo také vakua (0,2 MPa) nebo jejich kombinace (Holan, 2006).

Hloubková impregnace není vhodná pro veškeré druhy látek. Vodní sklo impregnovat nelze, protože obsahuje pevné částice příliš velké, než aby byly vtlačeny do dřeva. K aplikaci ochranné látky tlakovou impregnací se používají nejčastěji tlakové kotle.

Vzhledem k větší vrstvě ošetřené ochrannou látkou je tlaková impregnace účinnější v ochraně dřeva oproti povrchovému ošetření dřeva. U aglomerovaných materiálů lze ochrannou látku vpravit rovnou do hmoty materiálu. Tímto způsobem je možné dospět obdobných výsledků v ochraně jako u tlakové impregnace. Je potřeba mít ale na mysli možnou reakci lepidla a ochranné látky a podle toho zvolit vhodnou kombinaci (Horský, 1987).

4 Testování a hodnocení odolnosti dřeva proti ohni

Potřeba testování a hodnocení požární odolnosti dřeva je zcela zřejmá. Na základě testování a následného hodnocení lze popsat materiály, které jsou požárně bezpečné, či nikoli. Dále lze díky testování materiály vylepšovat a modifikovat, aby byly požárně bezpečnější a vykazovali vyšší odolnost proti účinkům ohně. Důležitá otázka zní, jak co nejlépe testovat daný materiál, aby následné hodnocení bylo objektivní. Každé neobjektivní hodnocení může mít za následek nesprávné použití materiálu což může stát nejen materiální újmu, ale zejména újmu na lidském zdraví či životě (Osvald, 2009).

Správně navrhnutá hodnotící kritéria testu jsou základním kamenem úspěšného testování a hodnocení. Z tohoto důvodu bylo zkonstruováno velké množství testovacích metod. Metody se vyznačují konstantními podmínkami testování a specifickým způsobem vyhodnocení, kdy se na různé materiály aplikují různé metody, aby se předešlo jakémukoliv ovlivnění či neobjektivitě. Postupem času se došlo ke zkvalitnění testovacích metod a k jejich harmonizaci, takže jejich podmínky testování a aplikace vzniklých výsledku byly na dobré úrovni. V dnešní době se stal posledním vývojovým článkem v metodice testování a hodnocení norma testování podle EU. Norma testování podle EU spojuje více druhů testovacích metod, které mají trvale stanovená kritéria a tím přispívá k objektivnímu hodnocení požární odolnosti. Zkušební postupy, které se používají podle norem EU s tabulkou 6, v které jsou uvedeny třídy reakce na oheň, jsou uvedeny zde:

- zkouška nehořlavosti STN EN ISO 1182. Výrobky a stavení prvky významně nepřispívající k požáru bez ohledu na jejich konečné použití. Zkouška je vytyčena pro třídy A1, A2, A1fi, A2fi,
- zkouška spalného tepla STN EN ISO 1716. Má za úkol zjistit nejvyšší možnou hodnotu celkového uvolněného tepla při úplném spálení výrobku. Zkouška je vytyčena pro třídy A1, A2, A1fi, A2fi,
- zkouška osaměle hořícího předmětu STN EN 13823. Zkouška zjišťuje možný vliv výrobku na rozvoj požáru při simulaci požáru osaměle

hořícího předmětu v rohu místnosti blízko zkoušeného výrobku. Zkouška je vytyčena pro třídy A2, B, C, D,

- zkouška zápalnosti STN EN ISO 11925-2. Zkouška určena k zjištění zapalitelnosti výrobku při vystavení účinkům malého plamene. Zkouška je vytyčena pro třídy B, C, D, E, Bfi, Cfi, Dfi, Efi,
- zjišťování chování podlahových krytin při hoření při sálavém zdroji tepla STN EN ISO 9239-1. Stanovuje se kritický sálavý tok, u něhož se plameny přestanou šířit po vodorovném povrchu. Zkouška je vytyčena pro třídy A2fi, Bfi, Cfi, Dfi (Osvald, 2009).

Tabulka 6: 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		
$THR_{600s} \leq 7,5\text{ MJ}$		kapky/částice ⁽⁶⁾		
B	STN EN 13823	$FIGRA \leq 120\text{W} \cdot \text{s}^{-1}$	Tvorba dýmu ⁽⁵⁾	
		$LVS < \text{okraj vzorku}$		Hořící
		$THR_{600s} \leq 7,5\text{ MJ}$		
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⁾	
		$LVS < \text{okraj vzorku}$		Hořící
		$THR_{600s} \leq 15\text{ MJ}$		
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⁾	
	STN EN ISO 11925-2 ⁽⁸⁾ Expozice = 30 s	$F_s \leq 150\text{ mm za } 60\text{ s}$	Hořící kapky/částice ⁽⁶⁾	
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)

Tabulka 7: 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	$PSC \leq 2,0\text{MJ}.kg^{-1(1)}$	-
$PSC \leq 2,0\text{MJ}.kg^{-1(2)(2a)}$			
$PSC \leq 1,4\text{MJ}.m^{-2(3)}$			
$PSC \leq 2,0\text{MJ}.kg^{-1(4)}$			
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	$PSC \leq 3,0\text{MJ}.kg^{-1(1)}$	-
		$PSC \leq 4,0\text{MJ}.kg^{-1(2)}$	
		$PSC \leq 4,0\text{MJ}.kg^{-1(3)}$	
		$PSC \leq 3,0\text{MJ}.kg^{-1(4)}$	
	STN EN 9239-1 ⁽⁹⁾	$Kritický\ tok^{(10)} \geq 8,0\text{ kW}.m^{-2}$	Tvorba dýmu ⁽¹¹⁾
B _{fi}	STN EN 9239-1 ⁽⁹⁾	$Kritický\ tok^{(10)} \geq 8,0\text{ kW}.m^{-2}$	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⁾	$Kritický\ tok^{(10)} \geq 4,5\text{ kW}.m^{-2}$	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⁾	$Kritický\ tok^{(10)} \geq 3,0\text{ kW}.m^{-2}$	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. $s_1 = \text{SMOGRA} \leq 30 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ a $\text{TPS}_{600\text{s}} = \leq 50 \text{ m}^2$. $s_2 = \text{SMOGRA} \leq 180 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ a $\text{TPS}_{600\text{s}} = \leq 200 \text{ m}^2$. $s_3 =$ nesplňuje s_1 nebo s_2 ,
- (6) d_0 =žádné hořící kapky/částice při zkoušce podle EN 13823 v čase 600 s, d_1 =žádné hořící kapky/částice trvající déle než 10 s podle EN 13823 v čase 600 s, d_2 =nesplňuje d_0 nebo d_1 ,
- (7) vyhovuje=bez zapálení papíru (bez klasifikace). Nevyhovuje=zapálení papíru (klasifikace d_2),
- (8) v podmínkách vystavení povrchu vzorku plamenu a v případě vhodnosti, z hlediska konečného užívání i vystavení hrany vzorku plamenu,
- (9) délka zkoušky 30 min,
- (10) kritický tok je určený jako tok sálavého tepla, při kterém plamen zhasne, anebo tok sálavého tepla po 30 minutách zkoušky podle toho, který z nich je nižší (to je tok zodpovídající největšímu rozšíření plamene), $s_1 = \text{dym} \leq 750 \text{ \% minut}$,
- (11) s_2 =nesplní s_1 ,
- (12) v podmínkách vystavení povrchu vzorku plamenu a v případě vhodnosti, z hlediska konečného používání i vystavení hrany vzorku plamenu (Osvald, 2009).

5 Metodika

Testování podle norem EU, jejichž zkušební postupy jsou uvedeny v předešlé kapitole, jsou zcela jistě velice přesné, z důvodu velké objektivnosti a detailnímu postupu provedení zkoušky. Nicméně jejich provedení je o to více náročné a v některých podmínkách hůře proveditelné. Pro měření požární odolnosti byla zvolena metodika, které je odvozená z normy ČSN 73 0862/B-2 (1991). Jedná se o normu pro stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot. Podle této normy, byla před zavedením evropských norem, testovaná většina stavebních materiálů, které byly následně zařazeny do jednotlivých tříd hořlavosti. V tomto případě byla metodika modifikována.

Metoda je založena na bezprostředním působení plynového hořáku na zkušební těleso. Čas působení plamene je 10 min. Těleso se umísťuje pod úhlem 45° vůči vodorovné rovině. Plamen se umísťuje do středu zkušebního tělesa ze spodní strany tak, aby vzdálenost mezi okrajem hořáku a tělesem byla 10 cm.

Zdrojem plamene byl kahan USBEC 1011/1 propan, DIN – DVGW – Reg. Mr. NG – 2211AN0133, 1,7 kW. Hmotnost se zjišťovala na vahze Mettler Toledo typ NEW CLASSIC MF, model MS 1602S / MO1 (Mettler Toledo, Švýcarsko). Pro záznam naměřených hodnot se použil software BalanceLink (Mettler Toledo, Švýcarsko), který každých 10 sekund zaznamenával úbytek hmotnosti.

Vzhledem k postupu a průběhu měření lze rozdělit metodiku na tyto části:

- příprava zkušebních těles,
- termická modifikace zkušebních těles,
- zkouška požární odolnosti,
- vyhodnocení výsledků.

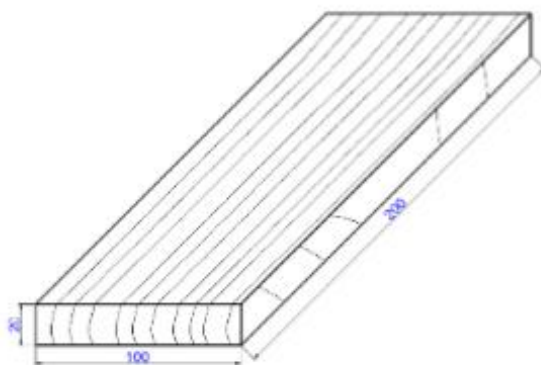
6 Metodika experimentální části

Pro měření požární odolnosti byla zvolena metodika, které je odvozená z normy ČSN 73 0862/B-2 (1991). Jedná se o normu pro stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot. Jedná se o metodiku popsanou v předešlé kapitole 5.

6.1 Příprava zkušebních těles

Pro zkušební vzorky o rozměrech 200 mm * 100 mm * 20 mm (směr axiální * radiální * tangenciální) byla zvolena dřevina Iroko. Rozměry vzorků jsou vyobrazeny na obrázku 12. Tato exotická dřevina pochází ze západní a střední Afriky a vyznačuje se žlutavě bílou bělí a zlatooranžovým jádrem. Dřevina obsahuje vysoký obsah olejnatých pryskyřic a z tohoto důvodu je velmi využívána pro exteriérové prvky, které jsou namáhané povětrnostními vlivy.

Zkušební tělesa se testovala v počtu 60-ti exemplářů, z čehož 20 vzorků bylo bez ochrany retardačním přípravkem, 20 vzorků se syntetickým retardérem a 20 vzorků s přírodním retardérem. Každých těchto 20 kusů vzorků obsahovalo všechny teploty tepelné modifikace po 5-ti kusech, tedy 160°C, 180°C, 210°C a bez tepelné modifikace 20°C.



Obrázek 12: Rozměry vzorků

Příprava zkušebních vzorků se skládá z následujících úkonů:

- vysušení vzorků – sušení probíhalo v sušárně ULM 400 při teplotě 103 °C,
- výpočet hustoty vzorků – výsledné hustoty vzorků jsou vidět v tabulce 8.
- označení vzorků – vzorky byly označeny systémem – druh dřeviny/stupeň termické modifikace/číslo vzorku/s retardérem nebo bez retardéru/typ retardéru
- nanesení retardérů – nanesení retardérů se uskutečnilo na 40-ti vzorcích a aplikace byla provedena pomocí štětce ve 2 vrstvách,
- měření hmotnosti vzorků – hmotnost se změřila pomocí laboratorní váhy MS 1602S při přesnosti 0,01 g.

Tabulka 8: Hustota před a po termické modifikaci

	Teplota modifikace vzorků (°C)			
	20 °C	160 °C	180 °C	210 °C
Hustota po modifikaci (kg/m ³)	743	730(12.2)	715(22)	726(20)

Hodnoty v závorkách udávají variační koeficient (CV) v %.

Zdroj: vlastní

6.1.1 Termická modifikace vzorků

Vzorky určené pro úpravu se tepelně upravily v tepelné komoře typu s 400/03. Termická úprava se aplikovala v různých teplotách, kdy vznikly 3 soubory o stupních úpravy 160 °C, 180 °C a 210 °C Termická modifikace probíhala podle metody TermoWood. Samotný proces tepelné modifikace vzorků lze rozdělit do tří bodů:

- ohřívání,
- tepelná modifikace,
- chlazení.

Jednotlivé parametry, tedy doba úprav při daných stupních termické modifikace, lze vidět v tabulce 9.

Tabulka 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	5.76 h	7.2 h
Celkový čas	18.52 h	23.56 h	28.8 h

Zdroj: vlastní

6.1.2 Chemická analýza vzorků

Pro zjištění chemického složení vzorků byly vzorky mechanicky zpracovány na formu pilin o velikosti frakce 0,5-1 mm a byly extrahovány v Soxhletově aparátu pomocí směsi toluenu a ethanolu podle ASTM D1107-96. Obsah ligninu se zjistil pomocí metody ASTM D1106-96. Obsah holocelulózy byl zjištěn pomocí metody autorů E. L. Wise, M. Murphyho a A. A. D'Addiecioio ,1946. Obsah celulózy byl stanoven Seifertovou metodou a hladiny hemicelulózy jako rozdíl mezi holocelulózou a celulózou. Všechna měření byla aplikována ve 4 opakováních na vzorek.

6.1.3 Aplikace syntetického retardéru

Jako vhodný antipyréní přípravek byl vybrán, velice v praxi používaný syntetický retardér, Flamgard, který vyrábí firma Stachema na Slovensku. Jde o jednosložkovou vodou ředitelnou zpěnitelnou nátěrovou hmotu, která je suspenzního charakteru. Hlavní prvky retardéru tvoří koksotvorná složka, kyselina fosforečná, napěňující složka, plniva a aditiva. Při kontaktu s ohněm vytváří protipožární nátěr na povrchu ošetřeného materiálu silnou nehořlavou tepelně izolující vrstvou, která zpomaluje proces hoření a dočasně chrání dřevěný materiál před ohněm a sálavým

teplem. Retardér se nanáší ve dvou vrstvách, kdy v jedné vrstvě vznikne nános o vydatnosti 200-250 g/m². Podmínky potřebné pro nanesení zpomalovače hoření jsou uvedeny v tabulce 10 (Stachema, 2019).

Tabulka 10: Podmínky pro nanesení Flamgardu

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

6.1.4 Aplikace přírodního retardéru

Jako retardér přírodního původu byl použit arabinogalaktan. Arabinogalaktany jsou hemicelulózy, které se hojně vyskytují v primárních a sekundárních buněčných stěnách rostlinných buněk. Ve většině rostlin se arabinogalaktany vyskytují v kovalentní asociaci s proteiny, buď jako proteoglykany nebo glykoproteiny. Tyto hemicelulózy jsou rozpustné ve vodě a lze je izolovat z modřínového dřeva v množství 10–20 % (Gaff a kol., 2019).

V praktické části byl arabinogalaktan aplikován jako povlak (16 g arabinogalaktanu na 1 000 g dřeva).

6.2 Výpočet a hodnocení naměřených výsledků

Pro výpočet hustoty dřeva byl použit vztah (4),

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad (4)$$

kde ρ_w je hustota vzorku při obsahu vlhkosti w (kg / m³); m_w je hmotnost (hmotnost) vzorku při obsahu vlhkosti w (kg); a V_w je objem vzorku při obsahu vlhkosti w (m³).

Obsah vlhkosti se vypočítal ze vztahu (5),

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100 \quad (5)$$

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).

Úbytek hmotnosti se vypočítal ze vztahu (6),

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} . 100 \quad (6)$$

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

Rychlost odhořívání se vypočítala ze vztahu (7),

$$v = \frac{m_t - m_{t+10}}{m_{t0}} * 10 \quad (7)$$

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.

Poměr maximální rychlosti hoření byl vypočten ze vztahu (8),

$$P = \frac{V_{max}}{T_{max}} \quad (8)$$

kde P je poměr maximální rychlosti hoření (%), V_{max} je maximální rychlost hoření (%/s) a T_{max} je maximální doba k dosažení maximální rychlosti hoření (s)

6.2.1 Vyhodnocení výsledků

Pro určení, jak velký vliv mají jednotlivé faktory na požární charakteristiky se byla provedena analýza rozptylu ANOVA a Fišerův F-test s pomocí softwaru Statistica 12 (Statsoft Inc., USA). Pro porovnání požárních charakteristik a chemického složení dřeva byla provedena analýza rozptylu ANOVA a Spearmanova korelace.

Více-faktorová analýza v softwaru Statistica 12, byla použita pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků. Díky této analýze rozptylu se hodnotí účinky jednotlivých faktorů a jejich vzájemnou kombinaci. K ohodnocení vzájemné kombinace faktorů a jejich účinků byl použit Fischerův F test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Hladinu významnosti nám stanoví hodnota P, dle jeho hodnoty lze testovaný faktor ohodnotit následovně:

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

(Milan Gaff, 2009).

7 Výsledky

7.1 Úbytek hmotnosti vlivem hoření

V tabulce 11 je možné vidět sledované faktory na úbytek hmotnosti vlivem hoření s hladinou významnosti $P = 0,05$. Jak je vidět, statisticky významné hodnoty byl pouze vliv retardéru, který v tomto případě opravdu významně snížil úbytek hmotnosti při hoření.

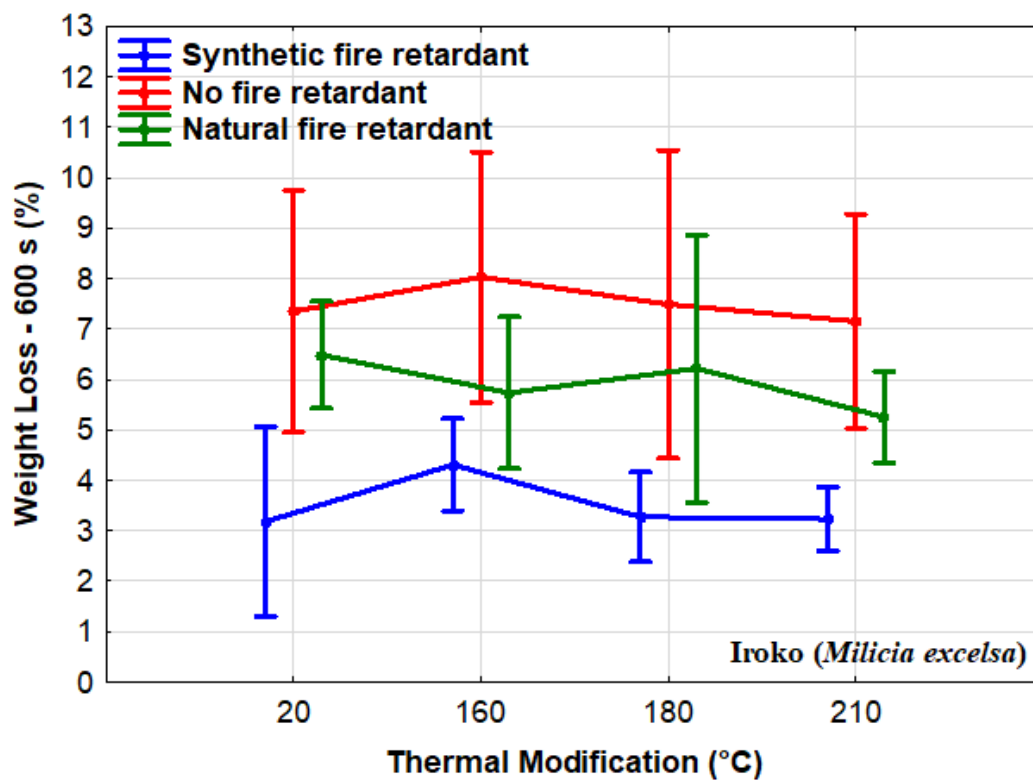
Tabulka 11: Vliv jednotlivých faktorů na úbytek hmotnosti

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Úbytek hmotnosti za 600 s (%)					
Intercepce	1909,467	1	1909,467	828,6786	***
Retardér (R)	163,008	2	81,504	35,3715	***
Tepelná modifikace (TM)	4,990	3	1,663	0,7218	NS
R x TM	5,960	6	0,993	0,4311	NS
Chyba	110,603	48	2,304		
Příslušný model vysvětluje zhruba 89 % z celkového součtu čtverců.					

NS-nevýznamné, ***-významné, $P < 0,05$

Zdroj: Vlastní

Přírodní retardér měl výrazně horší výsledek na úbytek hmotnosti a jeho účinnost nebyla statisticky významná. Vliv tepelné modifikace a retardéru na úbytek hmotnosti při hoření je znázorněna na obrázku 13. Nejvyšší úbytek hmotnosti byl změřen u tepelné úpravy 160 °C jak se syntetickým retardérem, tak bez použití retardéru.



Obrázek 13: Vliv tepelné modifikace na retardéru na úbytek hmotnosti

Zdroj: Vlastní

7.2 Rychlost hoření

Z tabulky 12 lze vyčíst, že na hladině významnosti $P = 0,05$ je statisticky významným faktorem pouze syntetický retardér, kdy významně snížil rychlost hoření. Ostatní vlivy se prokázaly jako statisticky nevýznamné, a proto nelze říct, že měli vliv na rychlost hoření.

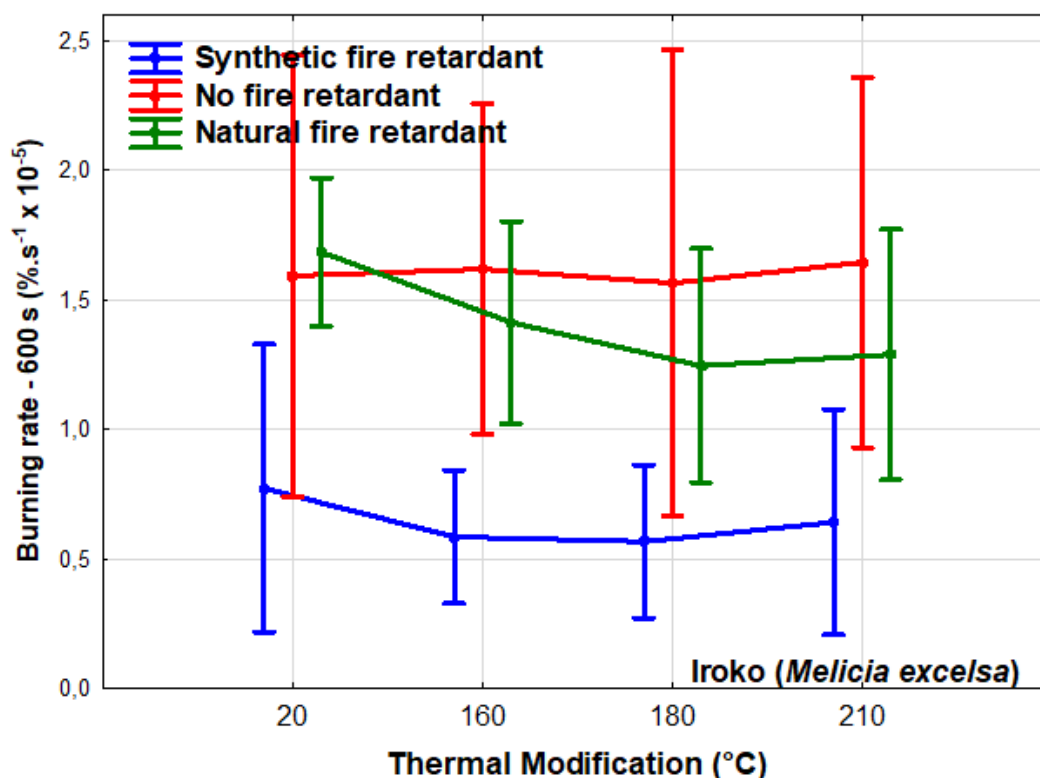
Tabulka 12: Vliv jednotlivých faktorů na rychlost hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Rychlost hoření 600 s (%.s⁻¹x10⁶)					
Intercepce	88,9284	1	88,92864	434,6048	***
Retardér (R)	10,27137	2	5,18569	25,2431	***
Tepelná modifikace (TM)	0,40266	3	0,13422	0,6559	NS
R x TM	0,33163	6	0,05527	0,2701	NS
Chyba	9,82174	48	0,20462		
Příslušný model vysvětluje zhruba 32.3 % z celkového součtu čtverců.					

NS-nevýznamné, ***-významné, P<0,05

Zdroj: Vlastní

Výsledky vlivu tepelné modifikace a retardéru na rychlost hoření lze pozorovat na obrázku 14. Účinnost přírodního retardéru u rychlosti hoření se nepotvrdila.



Obrázek 14: Vliv tepelné modifikace a retardéru na rychlost hoření

Zdroj: Vlastní

7.3 Maximální rychlost hoření

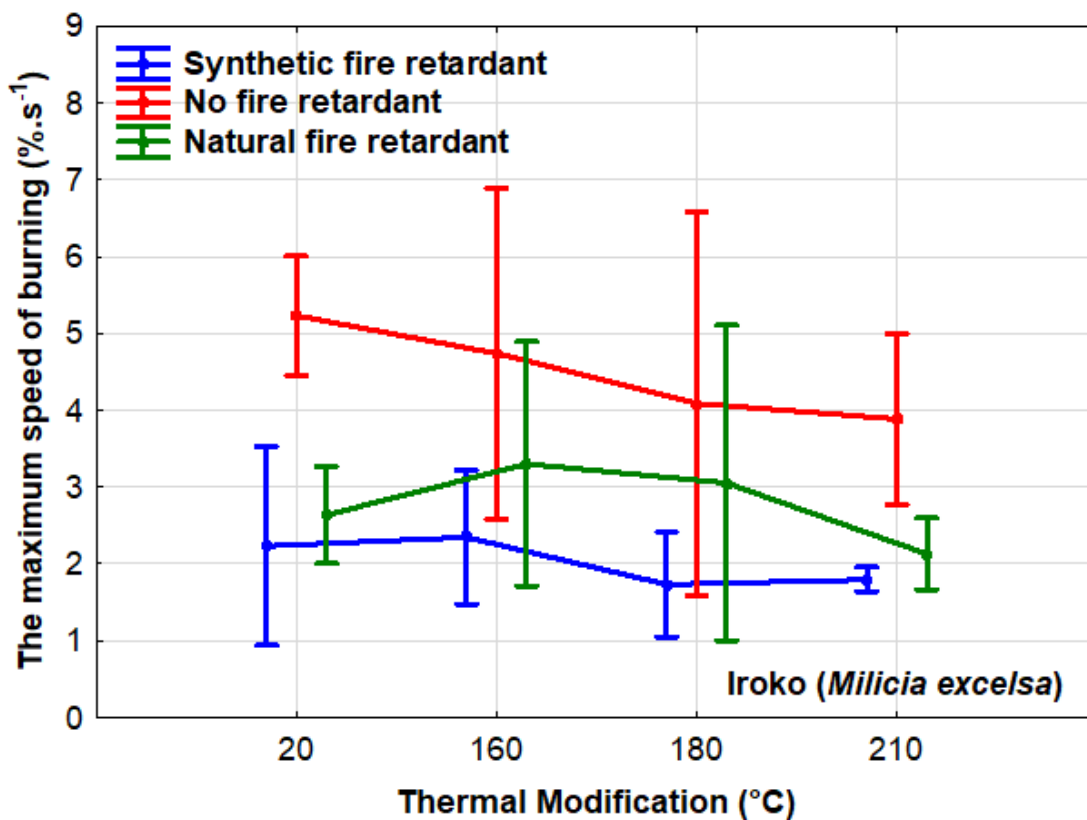
Jak je vidět v tabulce 13, statisticky významnou hodnotu menší než $P = 0,05$ dosáhl pouze syntetický retardér. Zbylé faktory jako termická modifikace a interakce termické modifikace a retardéru nebyli statisticky významné.

Tabulka 13: 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	575,5031	1	575,5031	235,5444	***
Retardér (R)	63,5137	2	31,7568	12,9976	***
Tepelná modifikace (TM)	7,0389	3	2,3463	0,9603	NS
R x TM	4,0214	6	0,6702	0,2743	NS
Chyba	117,2779	48	2,4433		
Příslušný model vysvětluje zhruba 73.8 % z celkového součtu čtverců.					

Zdroj: Vlastní

Vliv tepelné modifikace a retardéru na maximální rychlost hoření lze vidět na obrázku 15. Statisticky významná hodnota přírodního retardéru se potvrdila pouze u hodnot termické modifikace 210 °C a u těles bez termické modifikace.



Obrázek 15: Vliv tepelné modifikace a retardéru na maximální rychlost hoření
Zdroj: Vlastní

7.4 Poměr maximální rychlosti hoření

Výsledky statistického měření poměru maximální rychlosti lze vidět v tabulce 14. Zde se jako u třech předešlých charakteristik hoření potvrdil pouze vliv syntetického retardéru. Tepelná modifikace ani interakce termické modifikace a retardéru neměli statisticky významnou hodnotu.

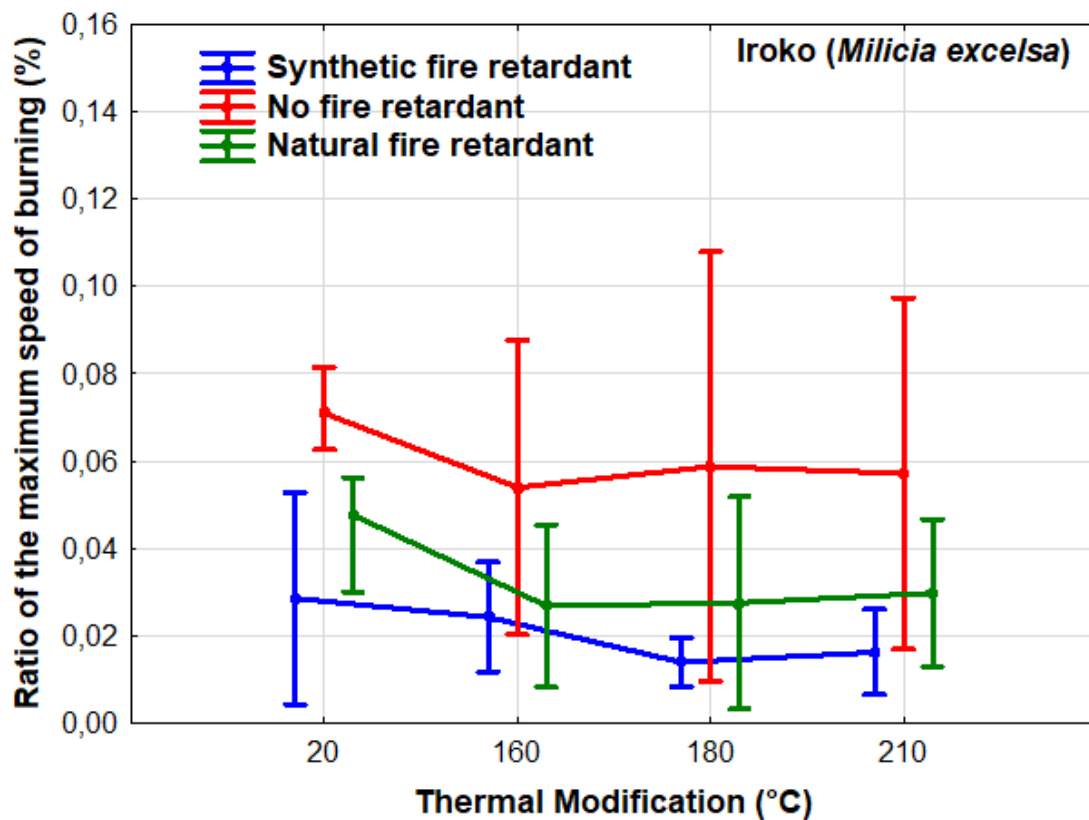
Tabulka 14: Vliv jednotlivých faktorů na poměr maximální rychlosti hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Poměr maximální rychlosti hoření (%)					
Intercepce	0,086424	1	0,086424	106,4849	***
Retardér (R)	0,016346	2	0,008173	10,0699	***
Tepelná modifikace (TM)	0,002486	3	0,000829	1,0209	NS
R x TM	0,000521	6	0,000087	0,1071	NS
Chyba	0,038957	48	0,000812		
Příslušný model vysvětluje zhruba 67.6 % z celkového součtu čtverců.					

NS-nevýznamné, ***-významné, $P < 0,05$

Zdroj: Vlastní

Vliv tepelné modifikace a retardéru na poměr maximální rychlosti hoření lze pozorovat z obrázku 16. Účinnost přírodního retardéru u poměru maximální rychlosti hoření se nepotvrdila, ale statisticky významné hodnoty dosáhla hodnota termické úpravy při 210 °C.



Obrázek 16: Vliv tepelné modifikace a retardéru na poměr maximální rychlosti hoření

Zdroj: Vlastní

7.5 Doba k dosažení maximální rychlosti hoření

Poslední ze sledovaných charakteristik byla doba k dosažení maximální rychlosti hoření. Statistické výsledky lze vidět v tabulce 15. Nebyla zde dokázána statistická významnost u žádného sledovaného faktoru, a to ani u retardérů.

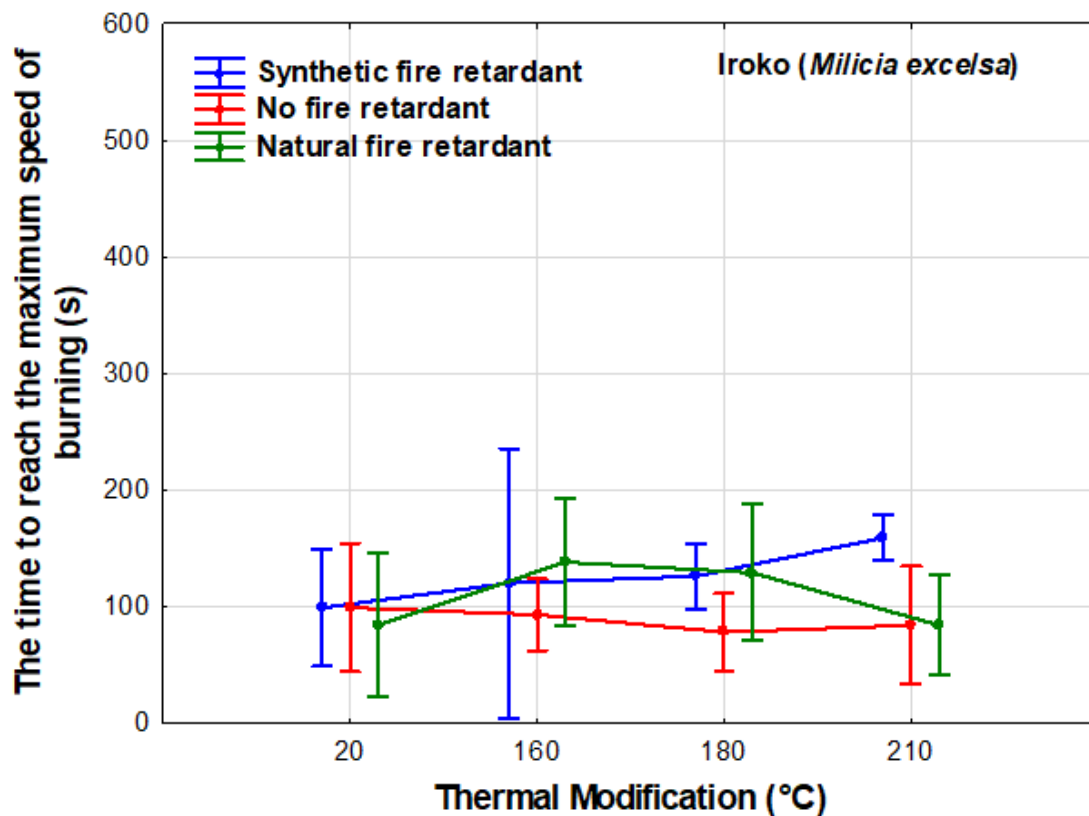
Tabulka 15: Vliv jednotlivých faktorů na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F - Test	Úroveň významnosti P
Doba k dosažení maximální rychlosti hoření (s)					
Intercepce	696603,8	1	696603,8	195,5379	***
Retardér (R)	14092,5	2	7046,2	1,9779	NS
Tepelná modifikace (TM)	4301,2	3	1433,7	0,4025	NS
R x TM	18727,5	6	3121,2	0,8761	NS
Chyba	171000,0	48	3562,5		
Příslušný model vysvětluje zhruba 69.9 % z celkového součtu čtverců.					

NS-nevýznamné, ***-významné, P<0,05

Zdroj: Vlastní

Průběh zkoušky lez pozorovat na obrázku 17. Zde je vidět, že žádná se sledovaných faktorů neměla statisticky významný vliv.



Obrázek 17: Vliv tepelné modifikace a retardéru na dobu k dosažení maximální rychlosti hoření

Zdroj: Vlastní

7.6 Charakteristiky hoření

Průměrné hodnoty charakteristik hoření vypočtené ze vztahů (6), (7), (8) jsou k nahlédnutí v tabulce 16.

Tabulka 16: Průměrné hodnoty charakteristik hoření

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 (16,23)	2 (13,25)	5 (7,41)	71 (13,37)	99 (14,95)
	160	8 (24,92)	2 (11,76)	7 (5,74)	54 (10,35)	93 (16,50)
	180	7 (12,91)	2 (16,46)	7 (10,18)	59 (17,41)	78 (14,40)
	210	7 (13,91)	2 (15,00)	6 (10,80)	57 (16,71)	84 (18,25)
Syntetický retardér hoření	20	3 (17,82)	1 (18,00)	4 (14,36)	29 (18,50)	99 (10,94)
	160	4 (17,02)	1 (15,44)	4 (13,02)	24 (11,49)	120 (17,56)
	180	3 (12,03)	1 (12,05)	3 (21,54)	14 (12,27)	126 (18,05)
	210	3 (15,76)	1 (14,74)	3 (15,32)	16 (18,59)	159 (17,13)

Zdroj: vlastní

7.7 Chemická analýza

V tabulce 17 jsou zaznamenány hodnoty chemické analýzy vzorků. Tepelná modifikace vedla k mírnému zvýšení relativního obsahu extraktů u teplotní úpravy 160 °C a 180 °C, významného zvýšení ligninu a celulózy u teplotní úpravy 210 °C, zatímco obsah holocelulózy a hemicelulóz klesal.

Chemická analýza byla vykonaná na Technické univerzitě ve Zvoleně za pomoci prof. RNDr. Františka Kačíka, PhD., za což mu velice děkuji.

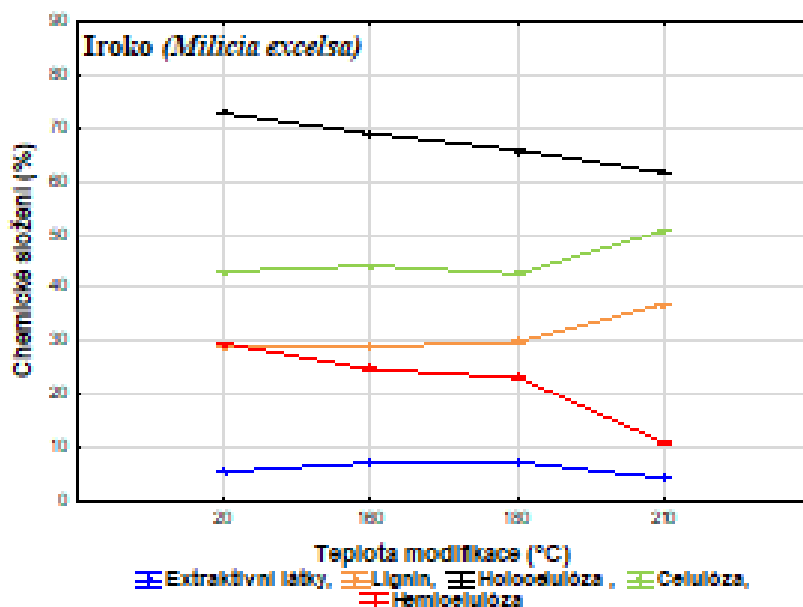
Tabulka 17: Chemická analýza vzorků

Teplota (°C)	Extraktiva (%)	Lignin (%)	Holocelulóza (%)	Celulóza (%)	Hemicelulóza (%)
Bez modifikace	5,49 (0,63)	28,94 (0,87)	72,74 (0,63)	43,15 (0,87)	29,59 (2,77)
160	7,17 (0,67)	29,01 (2,19)	69,26 (0,67)	44,07 (2,19)	25,20 (4,92)
180	7,28 (0,45)	29,98 (1,67)	65,88 (0,45)	43,02 (1,67)	22,86 (3,47)
210	4,34 (0,83)	36,89 (1,36)	61,71 (0,83)	50,67 (1,36)	11,03 (1,65)

Údaje představují střední procentní podíl hmotnosti sušiny v sušárně, čísla v závorkách představují variační koeficienty (CV) v %, n = 4.

Zdroj: vlastní

Obrázek 18 popisuje změny chemického složení dřeva u jednotlivých složek při různých teplotních úpravách.



Obrázek 18: Změny chemického složení

Zdroj: Vlastní

V tabulce 18 jsou vidět statistické výsledky vlivu teploty na množství jednotlivých složek ve dřevu. Na hladině významnosti $P = 0,05$ se u všech zkoumaných

složek dřeva potvrdil statisticky významný vliv teploty. Z toho vyplývá, že na změny hodnot složek dřeva naměřených v tabulce 16, má statisticky významný vliv teplota.

Tabulka 18: Vliv teploty na množství jednotlivých složek dřeva

Extraktivní látky (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	39920,43	1	39920,43	13142528	***
Teplota (°C)	1629,49	3	543,16	178819	***
Chyba	3,27	1076	0,00		***
Příslušný model popisuje zhruba 99.9 % z celkového počtu čtverců.					
Lignin (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	1051787	1	1051787	38805766	***
Teplota (°C)	11803	3	3934	145157	***
Chyba	29	1076	0		***
Příslušný model popisuje zhruba 99.9 % z celkového počtu čtverců.					
Holocelulóza (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	4885094	1	4885094	28168449	***
Teplota (°C)	17754	3	5918	34124	***
Chyba	187	1076	0		***
Příslušný model popisuje zhruba 98.5 % z celkového počtu čtverců.					
Celulóza (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	2198588	1	2198588	5750784	***
Teplota (°C)	11800	3	3933	10288	***
Chyba	411	1076	0		***
Příslušný model popisuje zhruba 95.3 % z celkového počtu čtverců.					

Hemicelulóza (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	529199,8	1	529199,8	1020225	***
Teplota (°C)	51787,7	3	17262,6	33280	***
Chyba	558,1	1076	0,5		***
Příslušný model popisuje zhruba 98,7 % z celkového počtu čtverců.					

Zdroj: Vlastní

NS-nevýznamné, ***-významné, P<0,05

Výsledky Spearmanovy korelace, které jsou vidět v tabulce 19, odhalily stupeň závislosti mezi charakteristikami hoření a chemickými složkami dřeva. Vysoké stupně závislosti dosáhli chemické složky dřeva a termické modifikace. Retardér ani žádná z charakteristik hoření se neprojevil takovou závislostí interakcí s chemickými složkami dřeva.

Tabulka 19: Spearmanova korelace mezi charakteristikami hoření a chemickým složením dřeva

Variable	FR	TM	WL	BR	MBR	RMBR	TRMBR	Ex.	Li.	Hol.	Cell.	Hemicell.
FR.	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TM.	0,00	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
WL.	0,52	-0,14	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BR.	0,57	-0,13	0,83	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-
MBR.	0,29	-0,17	0,86	0,63	1,00	-	-	-	-	-	-	-
RMBR.	0,23	-0,11	0,78	0,59	0,82	1,00	-	-	-	-	-	-
TRMBR.	-0,03	-0,02	-0,36	-0,28	-0,33	-0,78	1,00	-	-	-	-	-
Ex.	0,00	-0,19	0,06	-0,11	0,07	-0,11	0,22	1,00	-	-	-	-
Li.	0,00	0,86	-0,12	-0,03	-0,18	-0,05	-0,09	0,31	1,00	-	-	-
Hol.	0,00	-0,97	0,17	0,18	0,17	0,15	-0,04	0,18	-0,81	1,00	-	-
Cell.	0,00	0,50	-0,11	-0,05	-0,08	-0,01	-0,09	0,66	0,32	-0,50	1,00	-
Hemicell.	0,00	-0,92	0,18	0,17	0,18	0,13	0,01	0,26	-0,77	0,92	-0,67	1,00

Legenda: FR – Retardant, TM – Thermal modification, WL – Weight loss, BR – Burning rate, MBR – Maximum burning rate, RMBR – Ratio of the maximum burning rate, TRMBR – Time to reach the maximum burning rate, Ex. – Extractives, Li. – Lignin, Hol. – Holocellulose, Cell. – Cellulose, Hemicell. – Hemicelluloses.

Zdroj: Vlastní

8 Diskuze

Základem měření byly 2 soubory z nichž první tvořili vzorky bez ochrany retardérem hoření a druhý soubor se syntetickým retardérem hoření Flamgard. Pro porovnání účinnosti retardéru byl přidán třetí soubor se vzorky opatřenými přírodním retardérem v podobě arabinogalaktanu. Jelikož se zkoumal vliv nejen retardéru hoření na rostlé dřevo, ale i na dřevo termicky upravené, v každém souboru byly 3 různé termické úpravy (160 °C, 180 °C, 210 °C) a čtvrtina vzorků byla bez termické úpravy. Mezi sledovanými charakteristikami bylo 5 faktorů – úbytek hmotnosti při hoření, rychlost hoření, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření a doba k dosažení maximální rychlosti hoření. Základním sledovaným vlivem byl úbytek hmotnosti při hoření měřený v čase 10 minut po intervalech 10 sekund, díky němuž se skrz rovnice (6), (7) a (8) vypočítali zbylé charakteristiky hoření. Dále byla provedena chemická analýza vzorků, díky které se zjistilo množství jednotlivých složek dřeva (lignin, celulóza, holocelulóza, hemicelózy) jak ve dřevu bez termické úpravy, tak ve vzorcích s termickou úpravou. Tato analýza byla zásadní pro zjištění změn množství složek ve dřevu vlivem termické úpravy.

Všechny naměřená data musela být následně statisticky vyhodnocena, aby se potvrdil nebo vyvrátil výsledek měření. Vliv sledovaných faktorů jako termická modifikace, retardér a interakce termické modifikace spolu s retardérem na charakteristiky hoření se posuzoval pomocí Fišerova F-testu s hladinou významnosti $P = 0,05$. Ke stejnému postupu došlo i u zkoumání vlivu zvýšené teploty na množství chemických složek dřeva. Na závěr celého statistického vyhodnocení se porovnali hodnoty pomocí Spearmanovi korelace z důvodu zjištění možné závislosti charakteristik hoření na chemickém složení dřeva. Aby bylo možné objektivně zhodnotit výsledky statistických dat, porovnáme výsledky s výsledky již zveřejněných prací, které se týkaly podobných nebo stejných výzkumů, jen s rozdílem jiné dřeviny.

Jako první zhodnotím vliv faktorů termické modifikace, retardéru a interakce termické modifikace a retardéru na požární charakteristiky. Základní a první zkoumanou charakteristikou hoření byl úbytek hmotnosti při hoření v čase 10 minut. Zde se jako statisticky významný faktor projevil pouze retardér, a to retardér syntetický.

Účinek syntetického retardéru byl velice výrazný oproti retardéru přírodnímu. Při porovnání výsledků v jiných výzkumech se u úbytku hmotnosti projevil vliv všech faktorů u dřeviny teak, ale účinek přírodního retardéru na tuto požární charakteristiku se nepotvrdil (Gaff a kol., 2019). U dřeviny padouk se u úbytku hmotnosti projevil vliv všech faktorů (Jindřich, 2018). U smrku (Makovická, Gaff, 2018) se vliv ani jednoho faktoru na úbytek hmotnosti neprokázal.

Další sledovanou požární charakteristikou byla rychlost hoření. Zde se na hladině významnosti $P = 0,05$ projevila významnost syntetického retardéru. Přírodní retardér nedosáhl statistické významnosti. Při porovnání s výsledky v ostatních výzkumech dosáhlo u všech faktorů teakové dřevo statistické významnosti na tuto sledovanou požární charakteristiku a přírodní retardér se projevil jako účinný pouze u teplot termické modifikace 180 °C a 210 °C (Gaff a kol., 2019). Dřevo z padouky mělo statisticky významný pouze vliv retardéru, přičemž tepelná modifikace ani kombinace tepelné modifikace a retardéru neměli statistický význam (Jindřich, 2018).

Třetí sledovanou požární charakteristikou byla maximální rychlost hoření. Statistické významnosti byl pouze faktor retardéru, kdy syntetický retardér vyšší účinnosti než přírodní. U přírodního retardéru byl zaznamenán statisticky významný vliv pouze u dřeva termicky neupraveného a u dřeva termicky upraveného při 210 °C, takže je jeho účinnost na maximální rychlost hoření nejasná. Při porovnání s výsledky v ostatních výzkumech dosáhlo teakové dřevo statistické významnosti u retardéru a termické modifikace, kde se projevil jako účinný jak syntetický retardér, tak přírodní. (Gaff a kol., 2019). Dřevo z padouky mělo statisticky významné všechny faktory na tuto požární charakteristiku (Jindřich, 2018). Smrkové dřevo mělo statisticky významný vliv pouze retardéru (Makovická, Gaff, 2018).

Na poměr maximální rychlosti hoření byl stejně jako u předchozích požárních charakteristik zjištěn vliv pouze u faktoru retardéru. Přírodní retardér dosáhl statisticky významného vlivu pouze u termické úpravy při 210 °C, ale u ostatních teplot se jeho účinnost neprokázala. Při porovnání s výsledky v ostatních výzkumech dosáhlo teakové dřevo statistické významnosti u retardéru a termické modifikace, kde se projevil jako účinný pouze syntetický retardér (Gaff a kol., 2019). Dřevo z padouky mělo statisticky významné všechny faktory na tuto požární charakteristiku (Jindřich, 2018). U smrku

(Makovická, Gaff, 2018) se vliv ani jednoho faktoru na poměr maximální rychlosti neprokázal.

Poslední sledovanou požární charakteristikou byla doba k dosažení maximální rychlosti hoření. Zde nebyla prokázána statistická významnost u žádného ze sledovaných faktorů. Ke stejnému výsledku u této požární charakteristiky se dosáhlo i u výzkumu s teakovým dřevem (Gaff a kol., 2019). Oproti tomu u dřeva z padouku se dosáhlo statistické významnosti u všech faktorů (Jindřich, 2018). U smrku (Makovická, Gaff, 2018) se vliv ani jednoho faktoru na dobu k dosažení maximální rychlosti neprokázal.

U porovnání vlivu tepelné modifikace na chemické složení dřeva byla prokázána statistické významnost u všech složek dřeva. Tepelná modifikace vedla k mírnému zvýšení relativního obsahu extraktů u teplotní úpravy 160 °C a 180 °C, významného zvýšení ligninu a celulózy u teplotní úpravy 210°C, zatímco obsah holocelulózy a hemicelulóz klesal.

Při shrnutí poznatků z měření lze říci, že syntetický retardér má zcela jistě významný vliv na zlepšení protipožární odolnosti dřeva Iroko (*Milicia excelsa*). U přírodního retardéru se tato skutečnost nepotvrdila a jeho účinnost se prokázala pouze u maximální rychlosti hoření u dřeva termicky neupraveného a u dřeva termicky upraveného při 210 °C, takže je jeho účinnost na maximální rychlost hoření nejasná. Termická úprava neměla statistický význam u žádné požární charakteristiky, a proto nezhoršuje ani nezlepšuje protipožární vlastnosti dřeva Iroko (*Milicia excelsa*). U dat z chemického rozboru dřeva se prokázala závislost teploty na obsahu složek dřeva, kdy tepelná modifikace měla za následek mírné zvýšení obsahu extraktů u teplotní úpravy 160 °C a 180 °C, významného zvýšení ligninu a celulózy u teplotní úpravy 210 °C, zatímco obsah holocelulózy a hemicelulóz klesal. Ke stejnému závěru došel i výzkum provedený na jedli a habru (Tumen a kol., 2010) při teplotách 170 °C, 190°C a 210 °C.

S ostatními výzkumy se měření shoduje u prokázané účinnosti syntetického retardéru a neprokázané účinnosti přírodního retardéru. Naopak v ostatních výzkumech došlo k pozitivnímu ovlivnění protipožárních vlastností vlivem termické modifikace, což se u dřeviny iroko neprokázalo. To může být způsobené právě jiným druhem dřeviny, kdy jsou výsledky odlišné díky rozdílnému chemickému složení dřeva.

9 Závěr

Cílem práce bylo kromě shrnutí poznatků o protipožární problematice dřeva, zjistit vliv faktorů na požární charakteristiky a ověřit účinnost syntetického retardéru hoření. Vybrané charakteristiky se nepozorovali pouze na dřevu rostlém, ale i na dřevu termicky upraveném, a to při úpravách 160 °C, 180 °C a 210 °C. Jako druh dřeva bylo vybráno exotické dřevo iroko a syntetickým protipožárním nátěrem byl Flamgard. Pro porovnání protipožárních přípravků byl do měření přidán přírodní retardér ve formě arabinogalaktanu.

Metoda, podle které se uskutečnila metodika měření, byla odvozena z normy ČSN 73 0862/B-2 (1991). Už z předešlých výzkumů a měření se tato metodika osvědčila a potvrdila se její dostačující přesnost měření, která je dána zejména jednoduchou opakovatelností této metodiky. V rámci zkoušky se neprojevíly žádné obtíže, které by znesnadnily měření či ho ovlivnily.

Jako výsledek praktické části této práce lze říct, že syntetický protipožární přípravek má zcela jistě významný vliv na zlepšení protipožární odolnosti dřeva iroko. U přírodního retardéru se tato skutečnost nepotvrdila. Termická úprava neměla statistický význam u žádné požární charakteristiky, a proto nezhoršuje ani nezlepšuje protipožární vlastnosti dřeva iroko. U dat z chemického rozboru dřeva se prokázala závislost teploty na obsahu složek dřeva, kdy tepelná modifikace měla za následek zvýšení obsahu extraktivních látek, zvýšení obsahu ligninu a celulózy, přičemž obsah holocelulózy a hemicelulóz klesal.

Seznam použité literatury

Literatura

BENEŠ, P. – PUMPR, V. 2001. Základy chemie. Fortuna. 96 s. ISBN 978-80-7168-748-1

ČUNDERLÍK, I. – Štruktúra dreva. 2009. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2009. 133 s. ISBN 97-880-2282-0615

DEJMAL, A. 1995. Základy hydrotermické úpravy a ochrany dřeva. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 1995. 192 s. ISBN 80-7157-163-3

GANDELOVÁ, L. - ŠLEZINGEROVÁ, J. - HORÁČEK, P., 2002. Nauka o dřevě. Brno: Mendelova univerzita v Brně. 2002. 176 s. ISBN 80-7157-577-1

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

HORÁČEK, PETR. 1998. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 1 vydání. Brno: Mendelova univerzita v Brně. 1998. 124 s. ISBN 80-7157-347-7

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

CHOVANEC, D. – OSVALD, A. Spruce Wood Structure Changes Caused by Flame and Radiant Source. Zvolen: Technická universita vo Zvolene. 1992. 62 s. ISBN 80-228-0182-8

JANKOVSKÝ, M. – LACHMAN, J. – STASZKOVÁ, L. Chemie dřeva. Praha, 1999.

KUČERA, P. - ČESELKÁ, T. - MATEČKOVÁ, P. Požární odolnost stavebních konstrukcí. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. 176 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.

NOVOTNÝ, M. – SEDLÁČEK, S. – 1981. Teorie hoření výbuchu a iniciace. Pardubice: Vysoká škola chemickotechnologická. 236 s.

OSVALD, A. – ŠTEFKO, J. 2013. Modelový požiar dvojpodlažnej drevostavby. 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.

POŽGAJ, A. - CHOVANEC, D. - KURJATKO S. - BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

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

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

Skripta. ČZU. 211 s.

SPBI. 1999. Chemie procesů hoření. SPBI. 85 s. ISBN 80-86111-39-3

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

Internetové články

BARBER, D. - GERARD, R. Summary of the fire protection foundation report – fire safety challenges of tall wood buildings [online]. 2015 [cit. 2019-23-11]. <https://firesciencereviews.springeropen.com/articles/10.1186/s40038-015-0009-3>

BARCÍK, Š. – GAŠPARÍK, M. – RAZUMOV, E. 2015. Effect of temperature on the color changes of wood during thermal modification. 789-798

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

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

GAFF, M. – KAČÍK, F. – GAŠPARÍK, M. – TODARO, L. – JONES, D. – CORLETO, R. – MAKOVICKÁ OSVALDOVÁ, L. – ČEKOVSÁ, H. – 2019. The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak. 2019. Construction and Building Materials. 551-558

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

MAKOVICKÁ, L. – GAFF, M. 2018. Retardation effect on thermally modified spruce wood. BioResoutces. 947-959

MUNI. 2011. Degradace textilních materiálů. [online]. 2011 [cit. 2019-15-12]. https://is.muni.cz/el/1431/jaro2011/C5985/um/Degradace_textilu.pdf

STACHEMA. 2019. Technický list Flamgard. [online]. 20019 [cit. 2020–7-1]. <https://www.stachema.cz/files/files/TL-FLAMGARD.pdf>

STRAKA, B. Ochrana střešní konstrukce proti požáru. [online]. 2013 [cit. 2019-27-11]. https://www.krytiny-strechy.cz/technicke_info-k-navrhovani-strech/dopnkove-konstrukce-ve-strese-ostatni-informace/9338-ochrana-stresni-konstrukce-proti-pozaru-a.html#.XrG1dKgZPY

Tumen, I. - Aydemir, D. - Gündüz, G. - Uner, B. - Cetin, H. (2010). Changes in the chemical structure of thermally treated wood. Bioresources. 5. 1936-1944. 10.15376/biores.5.3.1936-1944.

VAŠÁTKO, E. Problematika desek a deskových konstrukcí v protipožární ochraně staveb. [online]. 2009 [cit.2019–27-12]. <http://www.seidl.cz/cz/publikace/problematika-desek-a-deskovych-konstrukci-v-protipozarni-ochrane-staveb-72.html>

VELKOVÁ, V. – KAČÍKOVÁ, D. – KAČÍK, F. – BUBENÍKOVÁ, T. – TREBULOVÁ, K. 2018. Tvorba prchavých produktov pri termickej degradácii retardáčne upraveného jedľového dreva. [online]. 2018 [cit. 2019-20-12]. <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/17526-tvorba-prchavych-produktov-pri-termickej-degradacii-retardacne-upraveneho-jedloveho-dreva>

WISE, L. E. - MURPHY, M. - D'ADDEICO, A. A. 1946. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. Paper Trade Journal, 122 s. 35–43.

Normy a metody

ASTM D1106-96

ASTM D1107-96

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