

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ



VLASTNOSTI THERMOWOODU V ZÁVISLOSTI NA
OCHRANNÝCH LÁTKÁCH

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ
KATEDRA ZPRACOVÁNÍ DŘEVA

**VLASTNOSTI THERMOWOODU V ZÁVISLOSTI NA
OCHRANNÝCH LÁTKÁCH**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Dřevařství

Pracoviště: Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

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

Konzultant bakalářské práce: Ing. Jiří Bouček

Praha 2021

Melánie Dubská

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Melánie Dubská

Dřevařství
Dřevařství

Název práce

Vlastnosti thermowoodu v závislosti na ochranných látkách

Název anglicky

Properties of thermowood depending on protective substances

Cíle práce

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

Druhá část práce je zaměřena na experimentální ověření získaných poznatků a jejich rozšíření vykonaným a vyhodnocení testů na vybrané dřevině.

Metodika

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

Doporučený rozsah práce

80 stran

Klíčová slova

požární charakteristiky, antipyrén, thermowood

Doporučené zdroje informací

- Boonstra, M. J., Van Acker, J., Tjeerdsma, B. F., and Kegel, E. V. (2007). "Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents," *Annals of Forest Science* 64(7), 679-690. DOI: 10.1051/forest: 2007048.
- Gaff, M., Sarvašová-Kvietková, M., Gašparík, M., Slávik, M., 2016. Dependence of roughness change and crack formation on parameters of wood surface embossing. *Wood Res.* 61, 163–174. <http://www.centrumdp.sk/wr/201601/16.pdf>
- 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
- 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.
- Tewarson, A. (1994). "Flammability parameters of materials: Ignition, combustion, and fire propagation," *Journal of Fire Sciences* 12(4), 329-356. DOI: 10.1177/073490419401200401
- Xing, D., and Li, J. (2014). "Effects of heat treatment on thermal decomposition and combustion performance of Larix spp. wood," *BioResources* 9(3), 4274-4287. DOI: 10.15376/biores.9.3.4274-4287
-

Předběžný termín obhajoby

2020/21 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. Jiří Bouček

Elektronicky schváleno dne 14. 7. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 21. 10. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vlastností thermowoodu v závislosti na ochranných látkách; vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD a konzultanta Ing. Jiřího Boučka, použila jen prameny a informace, které uvádím v seznamu použitých zdrojů a literatury.

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

V Praze, dne

.....

Melánie Dubská

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu panu doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD a konzultantovi panu Ing. Jiřímu Boučkovi. Za jejich čas, odborné vedení, užitečné rady a trpělivost k mé bakalářské práci.

Abstrakt ve státním jazyce

Cílem této bakalářské práce bylo získání nových poznatků v oboru charakteristiky reakce na oheň a zapalitelnosti rostlého dřeva a dřeva termicky modifikovaného neboli ošetřeného metodou thermowood v závislosti na aplikaci syntetického a přírodního retardéru (antipyrénů) či bez jejich aplikace. Testování, které jsme prováděli v experimentální části práce jsme vykonávali za účelem zjištění účinků retardérů hoření, které slouží na protipožární ochranu dřeva a zjištění vlivu termické modifikace, která je v posledních letech velmi žádanou úpravou dřeva.

Tuto práci jsme vykonávali na dřevině Javor (*Acer*). Zkušební vzorky byly ve tvaru čtverce o rozměrech přibližně kolem 100 x 100 x 20 mm. Celkem bylo testováno 60 vzorků, které se rozdělily do tří skupin podle použité ochrany dřeva, a to na skupinu bez použití ochrany, skupinu s ochranou syntetickým retardérem a poslední skupinu s ochranou přírodního antipyrénu. Tyto skupiny se dále dělily dle teploty termické úpravy (160 °C, 180 °C a 210 °C) a bez termické úpravy 20 °C. Měření charakteristik (maximální rychlosti hoření, čas při maximální rychlosti, celkové teplo, úbytek hmotnosti a rychlosti úbytku hmotnosti) jsme vykonávali na kónickém kalorimetru, na kterém na těleso působil plamen přibližně po dobu 30 minut.

Výsledkem celého měření bylo získání vybraných požárních charakteristik hoření (maximální rychlost hoření, čas při maximální rychlosti hoření, celkové teplo, úbytek hmotnosti a rychlost úbytku hmotnosti) a změn chemické stavby v závislosti na teplotě termické modifikace. Tyto vlastnosti jsme porovnávali v experimentální části práce, kdy došlo ke zjištění vlivu termické modifikace, u kterého dochází ke statistickému působení na charakteristiky reakce na oheň a zapalitelnosti určitého druhu dřeva a také potvrdil kladný vliv antipyrénů na prodloužení ochrany dřeva vůči ohni a vznícení. U výsledků chemické analýzy se potvrdil vliv na teplotu termické modifikace, kdy došlo ke změně obsahu chemických složek dřeva.

Klíčová slova: požární charakteristiky, antipyrén, thermowood

Abstrakt v cizím jazyce

This bachelor thesis aimed to gain new knowledge in the field of reaction to fire characteristics and flammability of grown wood and wood thermally modified or treated with thermowood depending on the application of synthetic and natural retarders (antipyrine) or without their application. We performed the testing that we performed in the experimental part of the work to determine the effects of flame retardants, which serve for fire protection of wood and to determine the effect of the thermal modification, which has been a very popular treatment of wood in recent years.

We performed this work on Javor (Acer) wood. The test specimens were in the shape of a square measuring approximately 100 x 100 x 20 mm. A total of 60 samples were tested, which were divided into three groups according to the wood protection used, namely the group without protection, the group with synthetic retarder protection and the last group with natural antipyrine protection. These groups were further divided according to the temperature of thermal treatment (160 °C, 180 °C and 210 °C) and without thermal treatment 20 °C. Measurements of characteristics (maximum burning rate, time at maximum rate, total heat, weight loss and rate of weight loss) were performed on a conical calorimeter, on which the body was exposed to the flame for approximately 30 minutes.

The result of the whole measurement was to obtain selected fire combustion characteristics (maximum burning rate, time at maximum burning rate, total heat, weight loss and weight loss rate) and changes in chemical structure depending on the temperature of thermal modification. We compared these properties in the experimental part of the work when we found the effect of the thermal modification, which has a statistical effect on the characteristics of reaction to fire and flammability of a certain type of wood and also confirmed the positive effect of antipyrine on extending wood protection against fire and ignition. The results of the chemical analysis confirmed the effect on the temperature of thermal modification when the content of chemical components of wood changed.

Key words: fire characteristics, antipyrine, thermowood

Obsah

Obsah	8
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek	13
Seznam zkratk a značek	14
Úvod	15
1 Cíl práce	17
2 Současný stav problematiky	18
3 Rostlé dřevo	19
3.1 Vlastnosti dřeva	19
3.1.1 Fyzikální vlastnosti	19
3.1.2 Mechanické vlastnosti dřeva.....	20
3.2 Chemické složení dřeva.....	21
3.2.1 Celulóza	22
3.2.2 Hemicelulóza	22
3.2.3 Holocelulóza	23
3.2.4 Lignin.....	23
3.2.5 Doprovodné (extrakční) složky.....	24
4 Modifikace dřeva.....	25
4.1 Termická modifikace dřeva.....	25
4.1.1 Chemické změny u termicky modifikovaného dřeva	27
4.2 Technologie výroby tepelně modifikovaného dřeva	28
4.2.1 Výroba ThermoWood®	29
4.2.2 Výroba Plato® Wood.....	30
4.2.3 Výroba RetificatWood	31
4.2.4 Výroba OHT-Wood	31
4.3 Vliv termicky modifikovaného dřeva na fyzikální a mechanické vlastnosti	32
4.3.1 Hygroskopičnost termicky modifikovaného dřeva	33
4.3.2 Tvarová stálost termicky modifikovaného dřeva.....	33
4.3.3 Hustota termicky modifikovaného dřeva.....	34
4.3.4 Barva a vůně termicky modifikovaného dřeva	34
4.3.5 Rovnovážný obsah vlhkosti termicky modifikovaného dřeva.....	35
4.3.6 Tepelná vodivost termicky modifikovaného dřeva.....	36

4.3.7	Tepelně izolační vlastnosti termicky modifikovaného dřeva	37
4.3.8	Pevnost termicky modifikovaného dřeva.....	37
4.4	Trvanlivost termicky modifikovaného dřeva	39
4.4.1	Biologická trvanlivost tepelně upraveného dřeva.....	39
4.4.2	Odolnost proti povětrnostním vlivům u termicky modifikovaného dřeva	39
4.4.3	Použití termicky modifikovaného dřeva.....	40
4.5	Protipožární vlastnosti termicky upraveného dřeva	41
4.5.1	Chemické a strukturální změny během hoření.....	41
4.5.2	Hoření dřeva.....	41
4.5.3	Proces hoření dřeva.....	42
4.5.4	Vlivy hoření dřeva	45
4.6	Ochrana dřeva vůči ohni.....	45
4.6.1	Ochrana dřeva tepelně izolujícími prostředky	46
5	Vliv antipyrénů na ochranu dřeva.....	47
5.1	Přehled přípravků na ochranu dřeva vůči ohni v ČR	48
5.1.1	Anorganické retardéry	48
5.1.2	Zpěňující (intumescentní) nátěry	48
5.2	Použití antipyrénů.....	49
6	Metodika	50
7	Metodika experimentální části.....	51
7.1	Příprava zkušebních těles	51
7.2	Značení zkušebních těles	51
7.3	Měření a vážení zkušebních těles	52
7.4	Tepelná modifikace zkušebních vzorků	52
7.5	Chemická analýza vzorků.....	53
7.6	Nanesení syntetického retardéru hoření	53
7.7	Nanesení přírodního retardéru hoření.....	53
7.8	Zkouška požární odolnosti	54
7.8.1	Části kónického kalorimetru	55
7.8.2	Kalibrace kónického kalorimetru.....	56
7.9	Výpočet získaných hodnot	57
7.10	Vyhodnocení získaných výsledků.....	59
8	Výsledky	60

8.1	Úbytek hmotnosti vzniklý vlivem hoření	60
8.2	Rychlost úbytku hmotnosti.....	62
8.3	Maximální rychlost hoření	65
8.4	Čas při $q(A, \max)$ (S)	68
8.5	Celkové teplo.....	71
8.6	Chemická analýza.....	74
9	Výsledky a diskuse	80
10	Závěr.....	83
	Citovaná literatura	85

Seznam obrázků

Obr. 1 Diagram pro modulu pružnosti dřeva.....	21
Obr. 2 Výrobní proces termicky modifikovaného dřeva ThermoWood®.....	30
Obr. 3 Vliv tepelného zpracování na hustotu borovice ošetřené po dobu 3 hodin při 160 až 240 °C. Průměrná hustota v teplotním rozsahu $T < 160$ °C je 560 kg/m ³	34
Obr. 4 Barevné změny borovice při tepelném zpracování ve 20 °C intervalech.....	35
Obr. 5 Vliv teploty u tepelné úpravy jedle na tepelnou vodivost.....	36
Obr. 6 Vliv teploty u tepelné úpravy bukového dřeva na teplotní vodivost.....	37
Obr. 7 Průměrné pevnosti v tlaku kolmo na vlákno termicky upraveného jedlové dřeva Uludag při použití tří odlišných teplot a dob působení.....	38
Obr. 8 Rozdíl dřeva během požáru.....	42
Obr. 9 Schéma procesu pyrolýzy a hoření dřeva.....	43
Obr. 10 Pěnová vrstva vzniklá pomocí intumescentními nátěry.....	49
Obr. 11 Vysušování naneseného retardéru na zkušebních vzorcích.....	54
Obr. 12 Schéma topného tělesa.....	55
Obr. 13 Testování na kónickém kalorimetru.....	57
Obr. 14 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňující vliv tepla na úbytku hmotnosti při použití daných retardérů.....	62
Obr. 15 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňuje vliv tepla na rychlost úbytku hmotnosti při použití daných retardérů.....	65
Obr. 16 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňuje vliv tepla na maximální teploty hoření za použití daných retardérů hoření.....	68
Obr. 17 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňuje vliv tepla na čas při maximální rychlosti za použití daných retardérů hoření.....	71
Obr. 18 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňuje vliv tepla na celkové teplo za použití daných retardérů hoření.....	74
Obr. 19 Graf 95 % interval spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a extraktivními látkami.....	77
Obr. 20 Graf 95 % intervalu spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a ligninem.	78
Obr. 21 Graf 95 % intervalu spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a holocelulózou.....	78
Obr. 22 Graf 95 % intervalu spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a celulózou.....	78

Obr. 23 Graf 95 % intervalu spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a hemicelulózou.....	79
---	----

Seznam tabulek

Tab. 1 Zastoupení hlavních chemických složek dřeva u vybraných jehličnatých a listnatých dřevin.....	21
Tab. 2 Hustota těles bez použití retardéru před a po termické úpravě.....	52
Tab. 3 Průměrné hodnoty úbytku hmotnosti nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem	60
Tab. 4 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na úbytek hmotnosti.....	61
Tab. 5 Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem	63
Tab. 6 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na rychlost úbytku hmotnosti	64
Tab. 7 Průměrné hodnoty max. rychlosti nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem	66
Tab. 8 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na maximální rychlost hoření	67
Tab. 9 Průměrné hodnoty času při max. rychlosti nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem	69
Tab. 10 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na čas při maximální rychlost hoření	70
Tab. 11 Průměrné hodnoty celkového tepla nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem	72
Tab. 12 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na celkové teplo	73
Tab. 13 Chemický rozbor vzorků	75
Tab. 14 Dopad teploty na množství dílčích složek dřeva	75
Tab. 15 Korelační koeficient určující charakteristiky mezi hořením a chemickou strukturou dřeva	77

Seznam zkratk a značek

OH	-	chemická skupina obsahující jeden atom kyslíku a vodíku
EMC	-	rovnovážný obsah vlhkosti dřeva
OHT	-	tepelně upravené dřevo za pomoci přírodních olejů
PVAC	-	polyvinylacetát (syntetický polymer)
HHR	-	rychlost uvolňování tepla (Heat Release Rate)
VOC	-	těkavé organické látky
TEE	-	ethanol-toluenové rozpouštědlo

Úvod

Dřevo je jedním z přírodních materiálů, který byl používán lidstvem už v dávných dobách. V současné době, kdy se začal brát větší důraz na obnovitelnost a zpracování přírodních surovin se dřevo stalo více využívaným materiálem v mnoha oblastech, nejen pro výrobu nábytku, ve stavebnictví, obkladových materiálů, ale i jako palivo. Jde o materiál, který je dobře opracovatelný a který má estetické využití (Narodoslawsky, a další, 2008). Z dostupných stavebních materiálů je dřevo jedním z nejlepších produktů, které se využívá jak v interiéru, tak i v exteriéru (Wegst, a další, 2004).

Právě díky svým vlastnostem je dřevo, tak využívaným materiálem. V závislosti na vlastnostech materiálů stojí zvolený materiál na možnosti použití v daném odvětví. Mezi nejhlavnější kladné vlastnosti u dřeva řadíme pevnost vůči jeho hmotnosti, lehká opracovatelnost, dostupnost, vzhled a v určitém pohledu i jeho hořlavost, která je produkována za účelem získání tepla, tedy využití dřeva jako paliva (Karmarkar, a další, 2007). Vlastnosti, které jsou u tohoto materiálu nežádoucí pro daná použití řadíme jeho hygroskopicitu neboli pohlcování okolní vlhkosti, anizotropii, bobtnání a nasákklivost, díky čemu dochází k tvarovým změnám dřeva, heterogenitu, odolnost vůči abiotickým a biotickým činitelům a již výše zmíněnou hořlavost, avšak v tomto případě ne z pohledu paliva, ale jako neúmyslné vznícení například u dřevěných staveb, nebo konstrukcí.

Právě jeho hořlavost, u které se provádělo už mnoho pokusů o zvýšení požární odolnosti, je popisovaná i zde. Tato problematika je spjata s potřebou měnit fyzikální a mechanické vlastnosti u různých druhů dřevin. Chování dřeva během požáru je spjata s více faktory, závisí především na vybraném druhu dřeviny, jeho velikosti, průřezu, vlhkosti a hustotě aj. V dnešní době již existují různé procesy výroby, aplikace ochranných látek a opracování dřeva, kterými by se negativní vlastnosti dřeva ve značné míře snížily. Do tohoto vylepšování vlastností spadá například tvarová ochrana dřeva, tepelná modifikace či nátěry. Právě díky těmto ochranám a snaze zamezit negativním vlastnostem se používání dřeva opět více využívá (Wilkie, a další, 2009).

Tato práce se zabývá změnami vlastností jak dřeva rostlého, tak i termicky upraveného, neboli Thermowoodu® na vybrané dřevině, přesněji javoru (*Acer*), v závislosti na aplikaci ochranných látek. Termicky modifikované dřevo je charakterizováno svou výrobou, kde díky kontrolovatelnému působení teploty na dřevo dochází ke zlepšování jeho vlastností jako odolnost vůči abiotickým a biotickým činitelům téměř bez ztráty

kladných vlastností. Vše je ovšem ovlivněno velikostí působící teploty a dobou jejího působení. Další výhodou Thermowoodu je jeho výroba, u které není použito žádných chemických látek a tím řadíme tento produkt k ekologickým, tedy k šetrnému k životnímu prostředí (Sandberg, a další, 2016). Například v roce 2019 byla produkce ThermoWood® 220 186 m³, která je vlastněná Mezinárodní asociací ThermoWood.

Právě problematika ohledně jeho negativní vlastnosti, a to hořlavosti a odolnosti dřeva vůči ohni, je zde zkoumána i za použití ochranných látek. Tato negativní vlastnost je závažná, zejména pro zvýšení ochrany stavebních dřevěných prvků vůči ohni. Zkoumání se provádí za účelem umožnění používání dřeva v různých oborech, především stavitelství. Jde především o schopnost snížení zápalnosti ohně a zpomalení hoření. Ve výsledku této práce jde o dosažení zjištění vhodných prostředků a typu procesu zpracování dřeva, u kterých dojde ke snížení nebo zamezení většímu šíření procesu hoření. Mezi tyto prostředky patří retardéry hoření, tedy antipyreny. I za použití těchto prostředků však nedocílíme nehořlavého materiálu (Eremina, a další, 2020).

Při vyhodnocení požární odolnosti u dřeva rostlého a termicky upraveného dřeva za aplikaci ochranných látek proti hoření, tedy retardérů hoření, můžeme dosáhnout nových informací a dosáhnout nového pohledu k lepšímu využití dřeva.

1 Cíl práce

Prvním krokem této práce je získání již zveřejněných znalostí formou analýzy literárních poznatků. Tedy poznatky k problematice popisující charakteristiky reakce na oheň, zapalitelnosti a jejich vlivu na rostlé a termicky upravené dřevo (thermowood®). Na základě, které jsme poté měřili s cílem rozšířit dosavadní známé informace.

Dalším cílem této práce je testování experimentálních vzorků dřeviny javor (*Acer*) za pomoci kónického kalorimetru. Tento stroj nám pomůže vyhodnotit charakteristiky reakce na oheň a zapalitelnost, mezi které patří úbytek hmotnosti, rychlost úbytku hmotnosti, celkové teplo, čas vzplanutí apod. Z tohoto stroje se získají potřebné hodnoty ke zjištění vlivu použitých retardérů (syntetický, přírodní) na zvolené charakteristiky hoření. Tyto hodnoty budeme také porovnávat se vzorky, které nejsou ošetřeny žádným retardérem. Dalším cílem je zkoumání vlivu teploty termické modifikace na hlavní chemické složky dřeva (extraktivní látky, lignin, celulóza, hemicelulóza, holocelulóza).

Posledním krokem této práce je porovnání a statistické vyhodnocení získaných dat, za účelem zjištění vlivu mezi rostlým dřevem a dřevem termicky upraveným, při použití retardérů hoření syntetického či přírodního nebo bez jejich aplikace. Také zjistit vliv jednotlivých faktorů, tedy retardéru a teploty termické modifikace a jejich interakce na vybrané charakteristiky reakce na oheň a zapalitelnosti.

2 Současný stav problematiky

Hlavním bodem této práce je vliv hoření na neupravené a termicky upravené dřevo, u kterého je důležité znát jeho proces výroby, a také dopad této úpravy na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Jde o příznivý materiál v ohledu k životnímu prostředí, který v posledních letech výrazně stoupl (Esteves, a další, 2009). Právě proto je Thermowood® více využíván, neboť z ekologického pohledu je tento produkt velmi šetrný k životnímu prostředí. Během výroby thermowoodu není použito žádných chemikálií, a i za své životnosti nepředstavuje větší nebezpečí pro životní prostředí než dřevo rostlé. Do popředí se Thermowood® dostává i díky možnosti využití různých druhů dřevin na produkty, u kterých doposud nebyla možnost použití vlivem svých vlastností.

Vůbec největší produkce termicky modifikovaného dřeva se nachází v severní Evropě, a to ve Finsku, kde se tento produkt poprvé objevil a byl patentován právě pod názvem Thermowood® (Gameche, a další, 2017). Výroba tepelně zpracovaného dřeva se výrazně zvýšila a stále roste po celém světě. Jedná se o relativně nový materiál (Reinprecht, a další, 2011).

3 Rostlé dřevo

Dřevo je jedním z výjimečných přírodních organických a obnovitelných materiálů, který je charakteristický svými kladnými, ale i nežádoucími vlastnostmi. Právě díky svým vlastnostem bylo dřevo používáno už v dávných dobách, kde byl tento materiál používán jako jeden z nejuniverzálnějších materiálů na různé konstrukce a předměty.

Jde o vysoce anizotropní materiál, neboť jeho vlastnosti jsou odlišné v závislosti na směru. Dále je také nehomogenní a hygroskopický. Dřevo je tvořeno z buněk, u jehličnatých dřevin jde především o vodivé cévy, jinak zvané tracheidy jdoucí ve směru vláknů. U listnatých dřevin se jedná o tracheje a ostatní buňky (Tyree, a další, 1991).

3.1 Vlastnosti dřeva

Vlastnosti dřeva jsou různá v závislosti na směru, jde o směr rovnoběžně s vláknem, nebo kolmo na vlákna (radiální, tangenciální směr). Rozdělujeme vlastnosti fyzikální a mechanické (Persson, 2020).

3.1.1 Fyzikální vlastnosti

Tyto vlastnosti jsou pozorovány, aniž by došlo k narušení chemické struktury a celistvosti materiálu. Určuje se zde vnější vzhled dřeva (barva, lesk, textura, vůně atd.), hmotnost dřeva (hustota, měrná hmotnost dřeva), vztahy dřeva k teplu (měrné teplo, měrná tepelná vodivost), ke zvuku (rezonanční a průzvučná schopnost), k elektřině (elektrická vodivost) a k vodě (vlhkost) (Gruda, a další, 2004).

3.1.1.1 Hmotnost dřeva

Objemová hmotnost (hustota) je z velké míry závislá na vlhkosti dřeva. Například u čerstvého dubu je jeho hustota ve výši až 1300 kg/m^3 , zatímco u dubu s vlhkostí 15 % se hustota sníží až na 690 kg/m^3 . Běžně se uvádí hustota dřeva s vlhkostí 12 %.

Dále můžeme vyjádřit měrnou hustotu dřevní substance, kde se jedná pouze o hmotnost dřeva jako materiálu. Měření se provádí bez vody, pórů, vzduchu a mezer. Udává se v suchém stavu, tedy při nulové vlhkosti (Williamson, a další, 2010).

3.1.1.2 Vlhkost dřeva

Další důležitou vlastností je vlhkost, která ovlivňuje rozměrovou stabilitu, únosnost a další vlastnosti dřeva. Jde o množství vody, které je procentuálně projevené z hmotnosti dřeva. Při nasycení jde přibližně o 25-35 %, proto se dřevo před použitím vysouší, jinak dochází ke vzniku trhlin, nebo napětí (Dejmal, 2017).

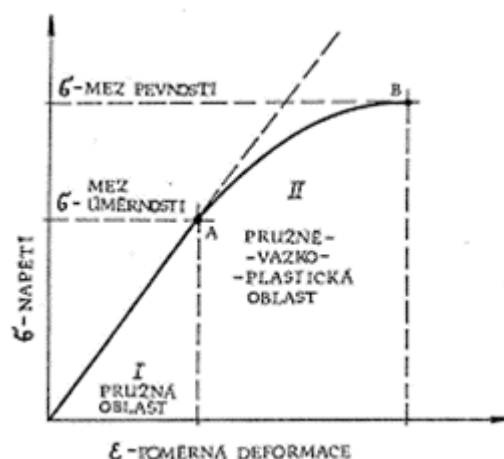
3.1.1.3 Tepelná vodivost dřeva

Tepelná vodivost je u dřeva nízká, tedy jde o lepší izolant. Lze ji definovat jako rychlost přenosu tepla. U velikosti vodivosti záleží na orientaci k vláknům. Ke zvyšování tepelné vodivosti dochází se zvyšováním hustoty, obsahu vlhkosti a teploty (Yan-jun, a další, 2011).

3.1.2 Mechanické vlastnosti dřeva

U mechanických vlastností jde především o pevnost a modul pružnosti, který je znázorněn na obr. 1. Mechanické vlastnosti ovlivňují schopnost dřeva odolávat účinkům vnějších sil. Obecně jsou tyto vlastnosti ovlivněny především druhem dřeva, vadami, rozměry, vlhkostí a zatížením (Macháček, 2018). Tyto vlastnosti rozdělujeme do tří skupin:

1. Základní: pevnost, pružnost, houževnatost a plastičnost
2. Odvozené: tvrdost, odolnost vůči trvalému zatížení, tečení i únavovému lomu
3. Technologické: opotřebovatelnost, ohýbatelnost, štípatelnost a impregnovatelnost (Macháček, 2018).



Obr. 1 Diagram pro modulu pružnosti dřeva

Zdroj: (Matovič, 1993)

3.2 Chemické složení dřeva

Obsah sušiny dřeva je z 50 % uhlík, ze 44% vodík a zbytek 6 % zastupuje kyslík. Dřevo je složené z větší části z organických sloučenin a z menší části z minerálních látek. Stavební část dřeva je zastoupena z polymerů celulózy (43-52 %), hemicelulózy (20-35 %) ligninu (20-30 %) a extraktivních látek (3-10 %). V tabulce 1 lze vidět zastoupení hlavních chemických složek dřeva společně s TEE (ethanol-toluenové rozpouštědlo) u vybraných dřevin.

Tab. 1 Zastoupení hlavních chemických složek dřeva u vybraných jehličnatých a listnatých dřevin.

Sample of Wood	TEE (%)	Holocellulose (%)	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Beech	2.3	82.5	46.7	35.8	20.7
Birch	2.9	84.2	45.4	38.8	17.7
Alder	6.6	77.2	44.1	33.1	22.0
Maple	2.5	80.1	44.6	35.5	24.9
Spruce	1.0	77.8	50.0	27.8	26.5
Pine	5.2	73.1	47.3	25.8	25.6
Oak	9.4	69.4	39.1	30.3	22.8

TEE, ethanol-toluene solvent.

Zdroj: (Geffert, a další, 2019)

3.2.1 Celulóza

Základní složkou dřeva je celulóza, která představuje nejrozšířenější organickou látku na světě. Jde o hlavní složku buněčných stěn rostlin. Podíl celulózy se pohybuje u jehličnatých dřevin kolem 46-55 %, zatímco u listnatých dřevin je podíl o něco menší, a to 41-48 %. U dřeva jde o strukturální jednotku buněčné stěny dřeva, kde její podíl určuje tvrdost dřeva (Dejmal, 2017). Základní jednotkou celulózy je tzv. celobióza, která se skládá ze dvou β -D-glukopyranosových jednotek a její polymerační stupeň je 5-14 tisíc (izolovaná celulóza 500 až 1500). Celulóza obsahuje dvě hlavní složky, které se nazývají krystalická forma a amorfní forma. Při vyšším podílu krystalické formy dochází k vyšší hustotě dřeva, pevnosti v tahu, rozměrové stabilitě, a také se zvýší Youngův modul pružnosti (Stamm, 1964).

3.2.2 Hemicelulóza

Jde o další směs polysacharidů ve dřevě. Hemicelulóza je ze dřeva snadněji hydrolyzována než celulóza. Výrazně ovlivňuje chemické a fyzikální vlastnosti dřeva. Její polymerační stupeň je 100 až 200. Jedná se o heteropolysacharidy, což znamená, že obsahují další hexony a pentosy (D-glikosa, D-galaktóza, D-xyloza, uronové kyseliny atd.) Hemicelulóza tvoří pojící složku celulózy a ligninu mezi jejich vlákny. U listnatých dřevin má podíl xylanu až 35 % s polymerizačním stupněm 100-200, zatímco u jehličnatých dřevin jde o 10-15 % s polymerizačním stupněm 70-130. Manany se u jehličnatých dřevin vyskytují až ve 20 % a u listnatých dřevin jen kolem 3-5 %. Jsou složeny z řetězce glukopyranózových a manopyranózových útvarů (hexózy) a jejich polymerizační stupeň je 60 až 70. Posledním polysacharidem je Galaktin, který má větší zastoupení v reakčním dřevě. Chemické vlastnosti hemicelulózy závisí na jeho délce řetězce, stupni rozvětvení a acetylaci. Pomocí zředěných alkálií je lze extrahovat, nějaké dokonce i vodou. Jsou snadno hydrolyzované a při technologických úkonech, jako je páření, vaření, lisování nebo sušení dřeva se vyznačuje vliv na jejich fyzikální a chemické vlastnosti (Gaff, a další, 2019) (Stamm, 1964).

V jehličnatých dřevinách je glukomanan hlavním typem hemicelulózy, který se skládá z podjednotek D-glukózy a D-manózy (hexózy). Jejich polymerizační stupeň je 60-70 (Jones, 2017).

3.2.3 Holocelulóza

Tato látka je ve vodě nerozpustná uhlovodíková frakce dřevěných produktů. Extrahovat ji lze pomocí chlorační metody odstraněním ligninu. Tento proces extrakce trvá kolem 6-8 hodin, do doby, než je lignin zcela odstraněn (Basu, 2018).

Využívá se pro přírodní adhezivum během výroby papíru. Jedná se o veškeré polysacharidové frakce ve dřevě, tedy celulózu a hemicelulózu. Lignin byl z tohoto extraktu odstraněn (Kirk, a další, 1984). Holocelulóza se v jehličnatých dřevinách nahází kolem 2/3, zatímco v listnatých dřevinách jde asi o 3/4 jejich chemického složení (Grexa, a další, 2001).

3.2.4 Lignin

Jedná se o druhý nejrozšířenější přírodní biopolymer hned po celulóze. Právě za zdřevnatění buněčných stěn stojí lignin, který je tvořen z aromatických alkoholů. Díky tomu není hydrofilní, tedy navlhavý. Během působení vysokých teplot je chemicky stabilnější než předešlé dvě složky (celulóza a hemicelulóza). Během působení se stává více plastickým (Dejmal, 2017). Má prostorově rozvrstvené makromolekuly. Vazba z polysacharidů se skládá pomocí van der Waalových sil, elektrostatických interakcí a chemických vazeb. U jehličnatých dřevin tvoří zastoupení mezi 24-33 %, u listnatých dřevin je jejich zastoupení nižší, a to v rámci 19-28 %. Lignin lze také popsat jako amorfni polyfenolickou látku, která vzniká dehydrogenativní polymerací tří fenolpropanových monomerů. Lignin se vyznačuje svou nepravidelnou strukturou a opakujícími se jednotkami. Jde o směs fyzikálních a chemicky heterogenních látek. Častým používaným názvem pro lignin je statický polymer hydroxyfenylpropanových jednotek. Ovlivnění vlastností dřeva ligninem je například dodávka tuhosti dřeva (vnitřní odpor materiálu vůči zdeformování, vlivem působení vnějších sil), zvýšená mechanická pevnost (napětí, které je daný materiál schopný snést), tedy v tlaku a ohybu, houževnatost (schopnost odolávání dynamickému či rázovému namáhání), snížená propustnost a zvýšená ochranná funkce rostlinných pletiv. V chemických vlastnostech jde například o vysokou absorpci světla. Využití najde třeba u energetických účelů, a jako přídavek k lepidlům během výroby velkoplošných materiálů (Kirk, a další, 1984) (Kubovský, a další, 2020).

3.2.5 Doprovodné (extrakční) složky

Jde o odlišné látky vyskytující se jen v menších množstvích. Tyto látky můžeme najít například v buněčných stěnách, lumenech nebo mezibuněčných prostorech. Doprovodné složky hrají roli především na vliv barvy, vůni, sušení, odolnost, trvanlivost a opracování dřeva. (Kirk, a další, 1984). U dělení těchto složek dostaneme látky anorganické a organické. Anorganické látky se při spálení změní v popel (max. 1 % dřevní hmoty), jsou získávány mineralizací zejména z draselné, vápenaté a hořečnaté soli ve formě krystalů. Ze 25 % lze tyto složky vylouhovat vodou. Z větší části soli vápníku a to až 50 % a naopak v menším množství P, Cl, Mn a Na. Do organických látek spadají sacharidy (pektinové látky, škrob atd.), fenolické látky, které mají funkci ochrany (lignany, flavonoidy, taniny atd.), terpeny a ostatní látky (Kubovský, a další, 2020).

4 Modifikace dřeva

Hlavním cílem u modifikace dřeva je zanechání pozitivních vlastností jako je například pevnost, tuhost, tvrdost, houževnatost, pružnost, tvarová stálost, nižší hygroskopicitata atd. a zároveň eliminovat nežádoucích vlastností, jako je například zvýšení odolnosti působení proti biotickým činitelům (plísně, rostliny, okus zvěři, hmyz atd.) a abiotickým činitelům (vítr, mráz, klima atd.). Modifikaci dělíme podle postupu na tepelnou, hydrotermickou, chemickou, v elektromagnetickém poli, pomocí impregnačních látek atd. Během modifikace dochází ke změně chemického složení dřeva. Za teplot 100° C a více dochází k vysušení dřeva a vzniku trhlin. Při teplotách nad 150°C začíná dřevo degradovat a vznikají plynné produkty. Dochází k dehydrataci dvou hlavních složek, tedy celulózy a hemicelulózy. Teploty přesahující 350° C způsobují rozklad ligninu a zuhelnatění dřevní hmoty (Dufková, 2011). U Thermowoodu se využívá tepelná modifikace dřeva (Reinprecht, 2008).

4.1 Termická modifikace dřeva

Termicky modifikované dřevo, které také nazýváme Thermowood® je způsob výroby, který se na trhu objevuje už téměř přes 22 let. Výroba tepelně modifikovaného dřeva se objevuje v západní části Evropy. Úplně prvním státem, který přišel s touto výrobou bylo Finsko, který své výrobky prodává právě pod názvem Thermowood®. Později se tato výroba rozšířila i v Rakousku, Holandsku a Francii (Esteves, a další, 2009).

Termickou úpravou dřeva je nazýváno dřevo, u kterého se vlivem zvýšené teploty mění jeho vlastnosti. Tato úprava se používala již v dávných dobách, kdy pravěcí lidé upravovali hroty oštěpů za účelem vyšší trvanlivosti. Také naši ne dávní předci pro zvýšení trvanlivosti používali opalování dřeva například u konců dřevěných sloupků určené k výstavbě plotů. Proces u termicky modifikovaného dřeva, který známe teď byl zaznamenán již ve 20. letech 20. století (Zobel, a další, 1998). Cílem této průmyslové tepelné úpravy dřeva je vylepšení vlastností u dostupných dřevin v kvalitnější produkt, který bude mít víceúčelové použití než před samotnou úpravou (Esteves, a další, 2009).

Vystavování dřeva vysokým teplotám není neobvykle, využívá se při různých technologických úkonech jako je například umělé sušení dřeva, páření a vaření v teplotním rozmezí 50-140 °C (Bekhta, a další, 2003). U výroby aglomerovaných materiálů (dřevotřískové, dřevovláknité, překližované a jiné materiály) se při lisování používá teplot od 110 až do maximálně 150°C. Jen u některých případech se teplota zvýší nad 150°C, ale to jen krátkodobě, tak že není výrazně zasaženo do vlastností dřeva, tudíž se nemění jeho chemická struktura. Ke změnám v chemické struktuře a tím i výraznějším změnám vlastností dřeva dochází až při dlouhodobém působení teplot nad 150°C (Bekhta, a další, 2003).

Jedná se o speciální zpracování různých druhů dřevin, jak listnatých, tak i jehličnatých. Lze ho definovat jako proces, ze kterého získává dřevina lepších vlastností, u kterého nedochází k zásahu životního prostředí ani po jeho životnosti. Dřevo je tepelně zpracované při vysokých teplotách, a to v rozmezí 150 až 240 °C. Termicky modifikované dřevo získává díky tomuto procesu vyšší odolnost vůči biologickým činitelům a současně se stává hydrofóbnější (Esteves, a další, 2009). U mechanického zpracování dřeva se dostává k řadě nedostatkům, jako jsou změny vlastností, nehomogenní struktura, přítomnost vad (trhliny aj.), anizotropie, otoky a smrštění. Těmto nevýhodám jde z části zabránit právě tepelnou modifikací dřeva a prodloužit životnost materiálu až trojnásobně (Barcík, a další, 2004).

Důležitým cílem tepelné úpravy rostlého dřeva je docílení takového materiálu, který by se přiblížil k těmto požadavkům:

- zvýšená odolnost proti napadení dřevokazným hmyzem,
- zvýšená rozměrová stabilita,
- nižší hygroskopičnost,
- mírné změny mechanických vlastností,
- změny barev na tmavší odstíny-estetická stránka
- zvýšená odolnost vůči dřevokazným i dřevo zbarvujícím houbám a plísním,
- zlepšení technologických vlastností (Reinprecht, a další, 2008).

U zpracovávaného materiálu (teplem upraveného masivního dřeva) se docílí trvalých změn vlastností v celém jeho průřezu (Dejmal, 2017). Právě zmíněné odolnosti proti dřevokazným činitelům, zlepšená rozměrová stabilita a snížená hygroskopicitata je dosažena za pomoci této tepelné technologické úpravě. Avšak tento technologický postup má i své nežádoucí účinky, jako je snížení rázové houževnatosti materiálu, pokles

pevnosti v ohybu, tlaku a nežádoucí estetické stránky, kde dochází k zabarvení až do tmavých odstínů dřeva. V zásadě jde o výskyt těchto účinků v závislosti na konkrétních podmínkách výroby jako je stupeň teploty a doba procesu. Termická úprava především o teplotách v rozmezí 150-170°C, způsobuje změnu chemické struktury dřeva, u které se poté promítají i změny fyzikálních a mechanických vlastností (Dejmal, 2017).

4.1.1 Chemické změny u termicky modifikovaného dřeva

Právě u termicky modifikovaného dřeva je změna chemické struktury zásadní, a proto je do ní zasahováno. Při tepelném zpracovávání dřevěného materiálu nad 150°C se zrychlují chemické reakce, a to vede k trvalým změnám v chemické struktuře polymerních sloučenin buněčné stěny. Během tohoto procesu je i zajištěna odolnost vůči biologické degradaci bez narušení stavby dřeva. Během této změny se také upravuje molekulární stavba dřeva tak, aby došlo k získání materiálu se sníženými rozměrovými změnami a nízkým rovnovážným obsahem vlhkosti (Aytin, a další, 2015). Degradace hemicelulózy je jedna z nejdůležitějších vlivů ovlivňující mechanické vlastnosti, a to především ohyb a pevnost v tahu (Čekovská, a další, 2017). Během tepelného zpracování dochází u ligninu k několika změnám ve vlastnostech dřeva, především barvy, ovšem při vystavení na denní světlo zapříčiňuje zesvětlení nebo až zašednutí materiálu (Kačíková, a další, 2020). Působení chemické struktury na výhřevnost dřeva je způsoben hlavně vyšší výhřevností ligninu ve srovnání s celulózou. Extrakční látky hrají důležitou roli v hodnotě výhřevnosti dřeva (Domingos, a další, 2020). Vlivem snížení adsorpce vody ve dřevě se zvyšuje již zmíněná rozměrová stabilita. Vše je ovlivněno působící teplotou a dobou, za kterou je na materiál působeno. Snížením hydroxylových skupin dřeva způsobené tepelným zpracováním způsobuje, že dřevo zadržuje vodu a buněčná stěna absorbuje méně vody. U termické úpravy se rovnovážný obsah vlhkosti sníží až o 50 % (Aytin, a další, 2015).

4.2 Technologie výroby tepelně modifikovaného dřeva

Během výroby tepelně modifikovaného dřeva mají všechny postupy zpracování dřeva společné teplotní rozmezí 160-260°C, při kterém na těleso působí (Kocaefe, a další, 2010). Při procesu výroby termicky modifikovaného dřeva nejsou využívány jakékoli toxické látky, využíváno je jen teplo (Kocaefe, a další, 2010). Tato výroba tedy odpovídá ekologickým požadavkům a nezasahuje do životního prostředí. Díky své vyšší trvanlivosti, kterou dřevo získalo působením tepelné modifikace je vhodnější do vnějších i vnitřních prostor v porovnání s rostlým dřevem. Pro výrobu tohoto produktu se používá i méně odolnějších dřevin, jako je smrk, borovice, buk, jasan a jiné (ThermoWood®Handbook, 2003).

Termická modifikace dřeva je jedním z druhů modifikace, při kterém dochází ke změně chemické struktury. Provádí se za účelem zlepšení jeho vlastností, především odolnosti proti vodě a biologickým činitelům. Během procesu však dochází i k menším negativním dopadům na fyzikální a mechanické vlastnosti upravovaného dřeva. Proces provádíme za použití jak suchého, tak i mokrého dřeva (Aydin, a další, 2005). V závislosti na dřevině a konečném produktu se liší podmínky procesu, které se mohou dělit na přítomnost plynů, jako je dusík a pára, nebo vlhké a suché procesy za použití olejů a podobně (Esteves, a další, 2009).

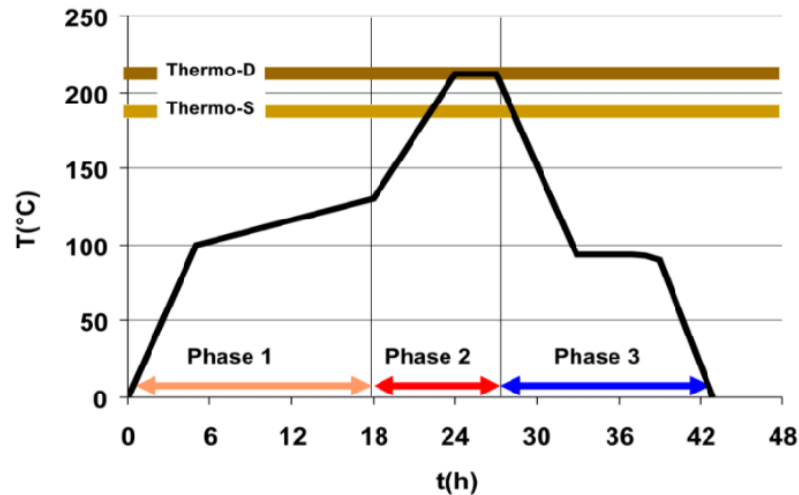
Thermowood se v dnešní době vyrábí několika technologiemi. V současnosti jde o tyto způsoby procesů výroby: (Thermowood®) za použití páry, (Plato®Wood) metodou kombinace páry a teplého vzduchu, (Rektifikace a Bois Perdure®) za použití interního plynu a (OHT-Wood, RoyalWood) pomocí vyhřátého rostlinného oleje. Liší se právě ve způsobu ohřevu a druhu použití k ochraně dřeva před kyslíkem, jako je již zmíněná pára, interní plyn a rostlinný olej (Domingos, a další, 2020). Avšak se stále vyvíjejí nové metody výroby. Všechny procesy výroby tepelně modifikovaného dřeva jsou chráněny patentem (např. 1995; EP0623433, 1994; EP0612595) (Esteves, a další, 2008). Výroba ThermoWood® se aktuálně pohybuje kolem 200 tisíc m^3 za rok, přičemž největší podíl vyprodukuje Finsko, Holandsko, Německo, Rakousko a Francie.

4.2.1 Výroba ThermoWood®

Je zhotovován tepelným zpracováním, přičemž teplotní rozsah se pohybuje od 160 až do 215°C. Během tohoto teplotního působení se mění vnitřní struktura dřeva a tím i fyzikální vlastnosti. U tohoto typu výroby dochází k ohřevu dřeva na hodnoty, které přesahují teplotu jeho samovznícení za pomoci vodní páry. Pára má v tomto procesu také ochrannou funkci.

Výrobní proces je rozložen do několika kroků:

- 1) V prvním kroku jde o ohřev a sušení. Nejprve se vysokoteplotní sušení provádí za pomoci páry, kdy je dřevo prudce ohřáté na 100° C, poté je teplota postupně zvyšována až na 130° C. Při průběhu tohoto procesu klesne vlhkost téměř na nulu. V závislosti na počáteční vlhkosti dřeva, druhu a tloušťce řeziva se určuje doma sušení (Cai, 2020).
- 2) Ve druhém kroku dochází k termické modifikaci, kde se teplota pohybuje okolo 185-215° C. Při získání požadované teploty se teplota udržuje po dobu 2-3 hodin. Pára se používá během tepelné úpravy k přenosu tepla a k zabránění vznícení nebo zuhelnatění dřeva. Na vybraném druhu Thermowoodu (Thermo-S nebo Thermo-D) se určuje velikost teploty a doba působení (Cai, 2020).
- 3) Ve třetím kroku dojde k ochlazení a úpravě vlhkosti. Jedná se o komory, kde se dřevo po termické modifikaci normalizuje. Zřetel se zde bere především na vysoký teplotní rozdíl mezi dřevem a venkovním vzduchem, který může zapříčinit praskliny. Teplota se tedy postupně ochlazuje na 80-90° C a na konci procesu se dřevo stabilizuje na vlhkost 5-7 % (Cai, 2020).



Obr. 2 Výrobní proces termicky modifikovaného dřeva ThermoWood®.

Zdroj: (ThermoWood®Handbook, 2003)

4.2.2 Výroba Plato® Wood

Další metodou tepelné úpravy dřeva je dvoustupňová metoda, která je známá pod názvem Plato® Wood (Boonstra, a další, 1998). Tato metoda tepelného zpracování se provádí za relativně mírnějších teplot (<200° C) (Boonstra, a další, 2006). Dřevo je upravováno v prostředí, kde působí horká pára a zvýšený tlak, podle patentovaného PLATO postupu pocházejícího z Holandska (Providing Lasting Advanced Timber Option).

Tato technologie je složena ze čtyř fází prováděna za normálního i zvýšeného tlaku, kde celková doba procesu závisí na vybrané dřevině a její tloušťce:

- 1) Prvním krokem je hydrotermolýza, tedy hydrotermická modifikace mokrého nebo usušeného dřeva při teplotách 150-190° C a tlaku 0,6-1 MPa v průměrném čase kolem 4-5 hodin. Pomocí proudící horké vody (používané u úpravy vysušeného dřeva) nebo horkého vzduchu (používané u úpravy mokrého dřeva). U suchého dřeva se vlhkost téměř nemění a zůstává kolem 14-20 %. V chemickém složení dochází ke změnám, a to částečným odbouráním hemicelulóz při tvorbě aldehydů a organických kyselin s aktivací ligninu. U celulózy nedochází téměř k žádným změnám (Barcík, a další, 2014).

-
- 2) Druhý krok spočívá v sušení dřeva, kde se sušení provádí v klasických sušárnách po dobu kolem 3-5 dnů, někdy však i do 3 týdnů na vlhkost 8 až 10 %.
 - 3) Ve třetím kroku dochází ke stabilizaci dřeva, tedy o vytvrzení po dobu 12 až 16 hodin při teplotě v rozmezí 150-190° C a konstantním atmosférickém tlaku 0,1 MPa, avšak při omezeném přístupu vzduchu. Aktivované makromolekuly ligninu upraveného dřeva se navzájem spojují pomocí rozkladných produktů hemicelulóz (organických kyselin a aldehydů). Při tomto kroku klesá vlhkost dřeva až pod 1 %.
 - 4) Posledním krokem tohoto procesu je kondenzování, kde dochází k opětovnému zvlhčení dřeva na obsah 4-6 %. Tento krok trvá až 3 dny.

4.2.3 Výroba RetificatedWood

Tento proces termicky modifikovaného dřeva se provádí v prostředí interních plynů. Jedná se o interní prostředí dusíku, ve kterém se rektifikované dřevo vyrábí, a to při relativně vysokých teplotách dosahující až 260° C, podle licenčního a patentovaného Rektifikačního procesu (NOW – New Option Wood, Francie) (Rapp, 2001).

Proces se provádí se dřevem, které bylo ještě před začátkem procesu vysušeno na vlhkost kolem 12 %. Postupně se toto dřevo zahřívá ve speciální komoře na teplotu v rozmezí od 210 do 240° C v atmosféře dusíku, kde je obsah kyslíku menší než 2 %. U tohoto modifikovaného dřeva dochází k mírné pyrolýze, ovšem termo-oxidační reakce ve dřevě postupují jen v lehké míře, tedy dojde k zachování jeho pevnosti (Rapp, a další, 2001).

Bois Perdue je druhým procesem podobnému Retificated procesu. Rozdílem je však, že během této výroby může být použito místo suchého dřeva dřevo čerstvé. Prvním krokem je tedy umělé usušení a poté je dřevo zahřáto na 230 ° C (Bal, 2015).

4.2.4 Výroba OHT-Wood

OHT-Wood spočívá ve výrově za pomoci horkých rostlinných olejů dle licencovaného OHT procesu (OHT – Oil Heat Treatment, Menz Holz, Německo).

Pro různé požadované stupně se používají odlišné teploty. Za účelem dosažení maximální životnosti a zároveň minimální spotřeby používaného oleje je proces provozován při teplotě 220° C. Zatím co za účelem maximální trvanlivosti a pevnosti dřeva jsou aplikovány teploty v rozmezí 180-200° C po dobu 2-4 hodin a je kontrolována absorpce oleje (Rapp, a další, 2001).

Topným médiem je už zmíněný olej, používaný je například olej řepkový, lněný nebo slunečnicový. Je určený pro rychlý a rovnoměrný přenos tepla do dřeva a obstarává stejné podmínky po celé nádobě (Rapp, a další, 2001). Zároveň odděluje kyslík od dřeva. To má za následek, že tepelná úprava v horkém (Rapp, a další, 2001).

Dalším procesem na výrobu tepelně upraveného dřeva v prostředí olejů je také technologie Royal proces (Royale procese, Osmose), který však působí za nízkých teplotách. Tato technologie Royal proces se používala spíše na sušení dřeva, a to v dřívějších dobách. Termická úprava za pomoci těchto olejů se vykonává za podstatně nižších teplot (60-90° C) a za sníženého tlaku. Tento proces se však v dnešní době téměř nepoužívá (Barcík, a další, 2004).

4.3 Vliv termicky modifikovaného dřeva na fyzikální a mechanické vlastnosti

Během výroby termicky modifikovaného dřeva především dochází k jeho změnám v ohledu rozměrové stability, hygroskopocity, hustoty a také barvy dřeva (Gašparík, a další, 2019). Důležitou změnou je také jeho vlastnost tepelné izolace a někdy i změny v akustických vlastnostech (Nhacila, a další, 2020). Rozsah fyzikálních a mechanických změn dřeva je hlavně ovlivněn druhem dřeva a použitým procesem výroby. Nejdůležitějším faktorem během procesu je teplota společně s dobou působení, vlhkostí dřeva a hladinou kyslíku (Percin, a další, 2016). Ke změně vlastností dřeva dochází především tepelnou degradací hemicelulóz (Gündüz, a další, 2008).

4.3.1 Hygroskopičnost termicky modifikovaného dřeva

Dřevo, u kterého došlo k tepelné úpravě dosahuje nižší hygroskopicity než dřevo přírodní. Hygroskopicita je ovlivněna především teplotou a dobou, za kterou je na dřevo působeno (Aytin, a další, 2015). Tato vlastnost může být považována za jednu z nejdůležitějších, neboť ovlivňuje i ostatní vlastnosti dřeva, jako je tvarová stálost, odolnost vůči napadení biologickými činiteli a trvanlivost (Gündüz, a další, 2008).

V podstatě jde o vlastnost dřeva, která má schopnost přijímat a také odevzdávat vodu do okolního ovzduší za dané teploty a rovnovážné vlhkosti okolního vzduchu (Yildiz, a další, 2005). Během studie (Stamm, a další, 1937) se u černého gumového dřeva hygroskopicita snížila z původní hodnoty až o polovinu, kde byly vzorky vystavovány po dobu 6 hodin teplotě 205 °C.

4.3.2 Tvarová stálost termicky modifikovaného dřeva

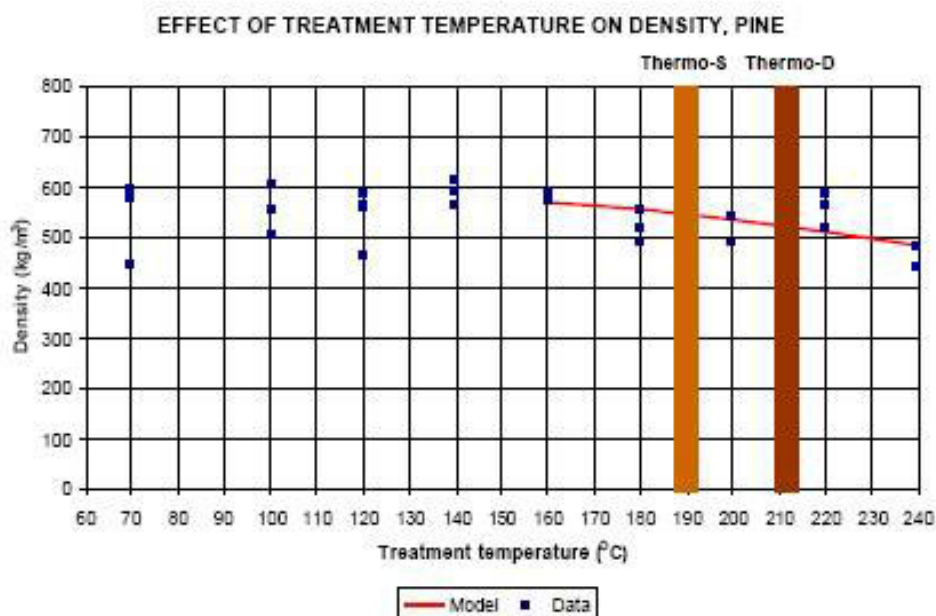
Vlivem tepelného zpracování dřeva dochází ke zlepšení rozměrové stability, zatímco u rostlého dřeva dochází k bobtnání a smršťování vlivem adsorpce a desorpce vody (Aytin, a další, 2015). Všeobecně je termicky modifikované dřevo poměrně hydrofobní s nízkou hodnotou bobtnání a sesychání (Domingos, a další, 2020).

Jde tedy o účinnost proti změně relativní vlhkosti v okolním vzduchu, kde se rozměry termicky modifikovaného dřeva mění výrazně méně oproti neupravenému rostlému dřevu. Tepelně upravené dřevo zpomaluje příjem vody, a proto buněčná stěna přímá méně vody, příčinou je snížení počtu hydroxylových skupin dřeva (Gündüz, a další, 2008). U teplotní úpravy dochází k výraznému snížení radiálního a tangenciálního bobtnání (ThermoWood®Handbook, 2003).

Tyto změny se objevují již při přibližně 150 °C a se zvýšením teploty změny pokračují. Tedy podle starších i nedávných výzkumů se v teplotním rozmezí 150-300 °C pro zahřátí dřeva v dusíku, nebo v ochranné atmosféře vzduchu lze prohlásit, že jeho nejvyšší hodnota tvarové stálosti je dosažena při 15-20 % snížení jeho hmotnosti (Gündüz, a další, 2008).

4.3.3 Hustota termicky modifikovaného dřeva

ThermoWood® dosahuje nižší hustoty než dřevo neupravené. Je to zejména díky změnám v hmotnosti, které se objeví po termické úpravě, kde dřevo ztrácí svou prvotní váhu. Hustota klesá za použití vyšších teplot při zpracování (ThermoWood®Handbook, 2003). U termicky modifikovaných tropických druhů dřevin je jejich trvanlivost závislá na hustotě (Gašparík, a další, 2019). S nízkou hustotou u těchto dřevin dochází k velmi obtížné impregnaci pomocí ochranných látek, dosahuje nízké rozměrové stability a také odpor proti houbám a hmyzu je velmi nízký (Rasdianah et al. 2018).



Obr. 3 Vliv tepelného zpracování na hustotu borovice ošetřené po dobu 3 hodin při 160 až 240 °C. Průměrná hustota v teplotním rozsahu $T < 160$ °C je 560 kg/m^3

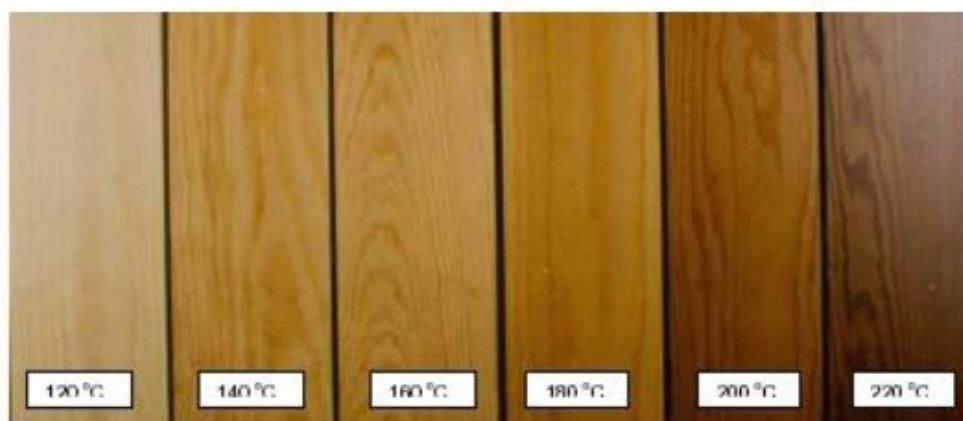
Zdroj: (ThermoWood®Handbook, 2003)

4.3.4 Barva a vůně termicky modifikovaného dřeva

Díky působení vysokých teplot dochází k trvalým změnám z estetického hlediska. Všeobecně platí, že během tepelné úpravy dosahují světlejší barvy dřeva tmavších odstínů. K tomu je dosaženo vlivem zvýšením fenolických skupin a během tepelné úpravy i stabilizací ligninu podle (Esteves, a další, 2009). Změna barvy je tedy dosažena

v důsledku komplexní chemie extraktivních látek a degradací ligninu při tepelném procesu, ke změně barvy mohou také přispívat hemicelulózy (Korkut, a další, 2013).

Při ohřívání dřeva pomocí rostlinných olejů dochází k neobvyklým změnám lesku a barvy dřeva (Nhacila, a další, 2020). Tepelně upravené dřevo může vést ke snížení aplikací povrchových úprav, které jsou na bázi rozpouštědel. Světlé až tmavé barvy dřeva, které vzniknou teplotním procesem, můžeme brát jako náhradu za některé tvrdé tropické dřeviny, které jsou ohrožené (Srinivas, a další, 2012). Při vyšších teplotních úpravách a také delší době působení dochází k větším změnám barev (Yan-jun, a další, 2002).



Obr. 4 Barevné změny borovice při tepelném zpracování ve 20 °C intervalech

Zdroj: (swm - wood)

U tepelně upraveného dřeva dochází i ke změně vůně, která může připomínat karamel. Důvodem jsou organické látky, které jsou vylouhované (VOC), neboli těkavé organické látky vznikající rozkládáním hemicelulóz, neboť jsou tyto látky volatilní, dojde u nich samozřejmě časem ke zmizení. U vyššího podílu těchto vylouhovaných produktů může docházet k nežádoucímu zapáchání, což může být problém pro jeho širší využití v rámci interiérového použití (Srinivas, a další, 2012). Vůně postupem času úplně zmizí. Jestliže jsou použity povrchové úpravy, dojde k okamžitému odstranění vůně.

4.3.5 Rovnovážný obsah vlhkosti termicky modifikovaného dřeva

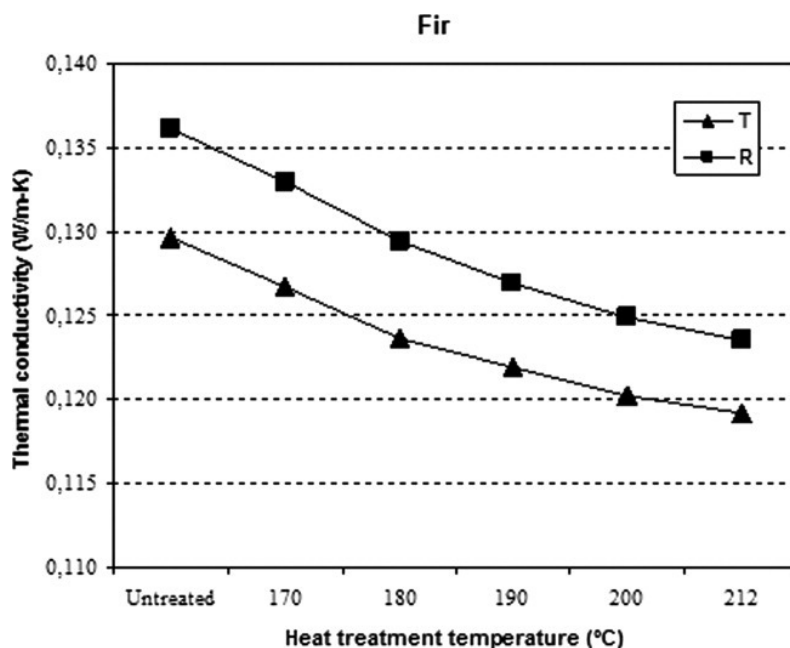
Vlivem působení tepelného procesu došlo ke snížení rovnovážného obsahu vlhkosti (EMC) dřeva. Snížení vzniklo v souvislosti se sníženým počtu hydrofilních míst ve dřevě,

především hydroxylových skupin uhlohydrátů. Koncentrace hydroxylových skupin absorbujících vodu klesá po tepelné úpravě s degradací sacharidů, to způsobuje pomalejší příjem a absorpci vody. Snížením EMC termicky upraveného dřeva může dojít ke snížení tepelné vodivosti dřeva (Kol, 2011).

4.3.6 Tepelná vodivost termicky modifikovaného dřeva

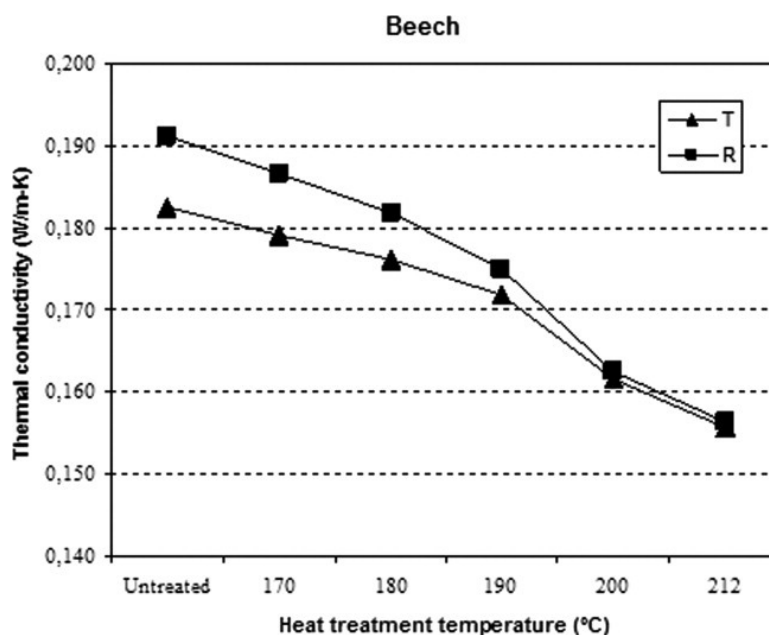
Tepelnou vodivost může popsat jako rychlost přenosu tepla jednotkovou tloušťkou daného materiálu na jednotku plochy a teplotního rozdílu. Jde o stanovení rychlosti teploty, která bude proudit materiálem. Při nízké hodnotě tepelné vodivosti jde o materiál se špatnou tepelnou vodivostí, zatím co u vyšších hodnot už můžeme říci, že se jedná o materiál s dobrou tepelnou vodivostí. Tepelná vodivost u dřeva se zvyšuje vzájemně s teplotou a hustotou obsahu vlhkosti.

Podle jedné studie, kde se porovnávala tepelná vodivost tepelně ošetřeného bukového a jedlového dřeva metodou Thermowood, při teplotách 170, 180, 190 a 212° C za čas 2 hodin se ukázalo, že tepelné ošetření zapříčinilo významné snížení této vlastnosti dřeva. Při teplotě 212° C došlo u obou požitých dřevin k největšímu snížení tepelné vodivosti. Velikost tohoto snížení závisí na druhu dřeva a teplotě, která na materiál působí (Kol, 2011).



Obr. 5 Vliv teploty u tepelné úpravy jedle na tepelnou vodivost.

Zdroj: (Kol, 2011)



Obr. 6 Vliv teploty u tepelné úpravy bukového dřeva na teplotní vodivost

Zdroj: (Kol, 2011)

4.3.7 Tepelně izolační vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Průměrně se u termicky modifikovaného dřeva snižuje tepelná vodivost v rozmezí od 10-30 %. Právě pro to se Thermowood využívá pro zahradní nábytek, podlahový materiál, obklady stěn, výrobu oken, a také sauny (Gündüz, a další, 2008).

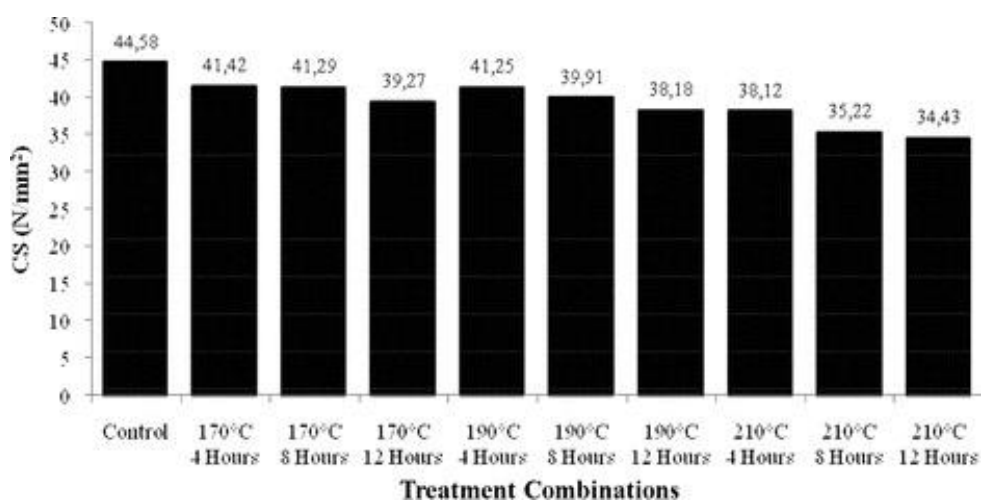
4.3.8 Pevnost termicky modifikovaného dřeva

U tepelného zpracování dřeva dochází k významným ztrátám mechanických vlastností, především v pevnosti v ohybu. U tepelně upraveného dřeva pomocí vzduchu dochází k vyšší ztrátě pevnosti než za úpravy plynem. Podle jedné studie na pevnost a tuhost v ohybu tepelně upraveného smrku, jehož úprava byla prováděna při teplotách 160° C po dobu 0,5 až 16 hodin ve vzduchu nebo dusíku, bylo zjištěno že nárazová houževnatost a pevnost v ohybu nejdříve vzrostla, ale poté poklesla. U tepelně ošetřeného dřeva pomocí dusíku, dochází k menším ztrátám v pevnosti v ohybu a rázové houževnatosti, než u dřeva ošetřeného vzduchem (Yan-jun, a další, 2002).

Vlastnosti pevnosti jsou závislé na určitém procesu zpracování dřeva, ale za každého procesu se upravené dřevo stane křehčí. Pevnost v ohybu může za teploty 230° C dosáhnout ztrát v rozmezí 30-40 %. Jak pevnost v ohybu, tak i pevnost v tahu je slabší. U pevnosti v tahu jde o ztrátu v rozmezí 10-30 % (Rapp, 2001). Pro dřevo, které je ošetřené při teplotě 230° C a vyšší se doporučuje využívat jej v oblastech, kde je dřevo vystaveno povětrnostním vlivům nebo vyšší vlhkosti, avšak ne v přímém kontaktu se zemí (Yan-jun, a další, 2002).

Ztráta pevnostních vlastností dřeva za tepelné úpravy velice souvisí s tepelnou degradací i ztrátou hmotnosti. Mimo jiné je lignin méně citlivější než hemicelulózy a degradace hemicelulóz a celulóza výrazně omezuje pevnostní vlastnosti (Gunduz, a další, 2010).

V jedné studii byly stanoveny průměrné pevnosti v tlaku kolmo na vlákna u jedlového dřeva Uludag termicky modifikovaného, za použití tří odlišných teplot a dob působení.



Obr. 7 Průměrné pevnosti v tlaku kolmo na vlákno termicky upraveného jedlové dřeva Uludag při použití tří odlišných teplot a dob působení.

Zdroj: (Gunduz, a další, 2010).

4.4 Trvanlivost termicky modifikovaného dřeva

Trvanlivostí dřeva se může především odvíjet od již zmíněné odolnosti proti působení plísní, dřevokaznému hmyzu a houbám, ale i ostatním biologickým škůdcům (Gündüz, a další, 2008). Řadí se zde i odolnost vůči povětrnostním vlivům, mechanickému opotřebení a požáru.

4.4.1 Biologická trvanlivost tepelně upraveného dřeva

U tepelného procesu platí, čím vyšších teplot je dosahováno, tím lepší je odolnost biologická. Teploty se pohybují v tomto případě od 150 do 260° C, kde dochází k větším změnám chemického složení. V závislosti na teplotě a době trvání se může zvýšit odolnost vůči konkrétním houbám. Ke zlepšení biologické odolnosti termicky modifikovaného dřeva přispívají změny v chemické struktuře dřeva (Ahmed, a další, 2017).

Jednou z možností je snížení OH funkčních skupin a zároveň zvýšení hydrofóbnosti u daného dřeva. Tím se dosahuje snížení sorpční kapacity a jeho vlhkosti, která je potřebná pro biologické činitele, kde je pro hmyz $w_{min} = 10 \%$ a pro houby $w_{min} = 20 \%$. Dalším faktorem může být snížení daného podílu hemicelulóz, který je pro vývoj hub a hmyz důležitý. Také při vzniku nových speciálních látek, které mají biocidní účinky, jejichž vývoj vznikl z tepelně degradovaných složek a z prvotních extrahovaných látek surového dřeva.

Schopnost odolávat proti plísním a hnilobě je důležitá v případě, kdy se vlhkost dřeva blíží k hodnotě 20 %. Thermowood je tedy odolnější v porovnání s neošetřeným dřevem proti všem již zmíněným biologickým činitelům.

4.4.2 Odolnost proti povětrnostním vlivům u termicky modifikovaného dřeva

U tepelně upraveného dřeva dochází k významným zlepšením vlastností vůči povětrnostním vlivům. Do této kategorie patří i působení UV záření slunečním paprskem,

vítr, kyslík, emise, déšť a jiné. Jako je tomu i jiných vlastností, rozsah změn vlastností závisí na použití daného procesu tepelné úpravy (Jirouš-Rajković, a další, 2017-2018).

Působení slunečního světla, zejména UV záření a viditelné světlo způsobuje tzv. fotochemickou degradaci, u které dochází ke změně počáteční barvy dřeva následovaná uvolněním dřevního vlákna a postupnou erozí povrchu dřeva. Barva dřeva se rychle mění z hnědé do odstínů šedé. Díky tomu se u použití tohoto materiálu v exteriérových oblastech doporučuje povrchová úprava za pomoci olejů nebo barvami (Blokland, a další, 2020).

4.4.3 Použití termicky modifikovaného dřeva

V závislosti na určitých teplotách použitých při zpracování se upravené dřevo používá v různých oborech. Při procesu se teplota pohybuje od 180 do 210° C, proto je dřevo upravené tímto procesem používáno tam, kde není požadováno vyšších pevnostních vlastností. Termicky modifikované dřevo je používáno v nábytkářství, pokládání podlah, nosných konstrukcí, obklady stěn a budov, a také při výstavbě saun (Yan-jun, a další, 2002).

Jestliže je požadováno lepších vlastností pro odolnost vůči povětrnostním vlivům či rozkladu, používají se vyšších teplot než 200° C. Během těchto teplot se však snižují pevnostní vlastnosti, jak již je zmíněno výše. I přes to, že se odolnost vůči hnilobě zlepší, nedoporučuje se tepelně ošetřené dřevo používat tam, kde dochází ke kontaktu se zemí (Rapp, 2001).

Technologií výroby tepelně upravených dřevin je více. Každý druh výroby termicky modifikovaného dřeva dosahuje specifických vlastností, které vyhovují daným kritériím v závislosti na jejich budoucím využití. Mezi druhy termicky modifikovaného dřeva patří například Plato Wood vyráběný v Holandsku, nebo více známý Thermowood® pocházející z Finska. Thermowood® se vyrábí ve dvou třídách rozdělený podle jehličnatých a listnatých dřevin na Thermo-D a Thermo-S, u kterých je jejich výrobní proces zobrazen na obr. 2. Tyto druhy se liší v procesu výroby, jako je doba a teplota působící na materiál. Rozdílné jsou i v možnostech pro možné použití (ThermoWood®Handbook, 2003).

4.5 Protipožární vlastnosti termicky upraveného dřeva

Díky zvýšenému množství termicky modifikovaného dřeva používaného ve dřevařském průmyslu a v interiérech vznikly požadavky na určení požárního rizika. Termicky upravené dřevo se z části shoduje se svými protipožárními vlastnostmi s vlastnostmi dřeva rostlého. To je však výjimkou u dřeva ošetřeného metodou OHT, kde se použitý olej ve vyšší míře dostane do dřeva a tím se sníží jeho protipožární odolnost (Reinprecht, 2008).

4.5.1 Chemické a strukturální změny během hoření

Během hoření dřeva dochází k různým typům chemických a strukturálních změn, u kterých hrají nejvýznamnější roli hlavní chemické složky dřeva, tedy celulóza, hemicelulóza a lignin. Důležitým faktorem u těchto změn je samozřejmě druh dřeva, chemická modifikace zapříčiněna tepelnou úpravou, případně typ retardéru (přírodní, syntetický) atd.

U tepelné úpravy dřeva dochází k významným chemickým změnám, jak jsme si již uvedly výše. Hlavními rozdíly v chemické struktuře lignocelulózových látek, ke kterým došlo při termické úpravě, jsou:

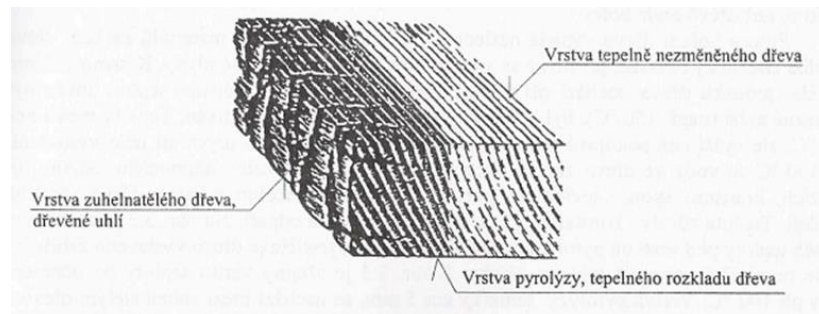
- rozpad ligninu a hemicelulózy,
- depolymerace sacharidů, která je zrychlená produkcí kyseliny octové a kyseliny mravenčí, a
- zvětšené zesíťování lignin-sacharidů.

U ligninu dochází k degradaci v teplotním rozsahu, zatím co u celulózy a hemicelulózy dochází k degradaci už od nižších až po vysokých teplot (Gaff, a další, 2019).

4.5.2 Hoření dřeva

Z důvodu, že dřevo je surovina hořlavá je důležitým krokem podstupovat ochranou úpravu pro jeho vyšší odolnost vůči ohni. Hoření dřeva probíhá jako odezva mezi plyny, které jsou uvolněné z materiálu s kyslíkem (až na žhnoucí spalování páleného dřeva, kde

kyslík reaguje rovnou s uhlíkem). Za působení teploty dochází u dřeva k snadnému produkování látek, u kterých dochází k reakci s kyslíkem, což vede k vyšší tendenci vznícení a hoření dřeva (InnoFireWood).



Obr. 8 Rozdíl dřeva během požáru

Zdroj: (Dufková, 2011)

Při vznícení dřeva dojde k rychlému vzplanutí jeho povrchu, ale to jen do doby, než vznikne zuhelnatělá vrstva dřevního materiálu. Tato vrstva má vlastnost zabraňující přístupu vzduchu do vnitřních složek průřezů elementů, také má dobré tepelněizolační vlastnosti a zpomalování hoření. I za použití možných povrchových úprav nebo impregnací nelze ze dřeva vytvořit nehořlavý materiál (Dufková, 2011).

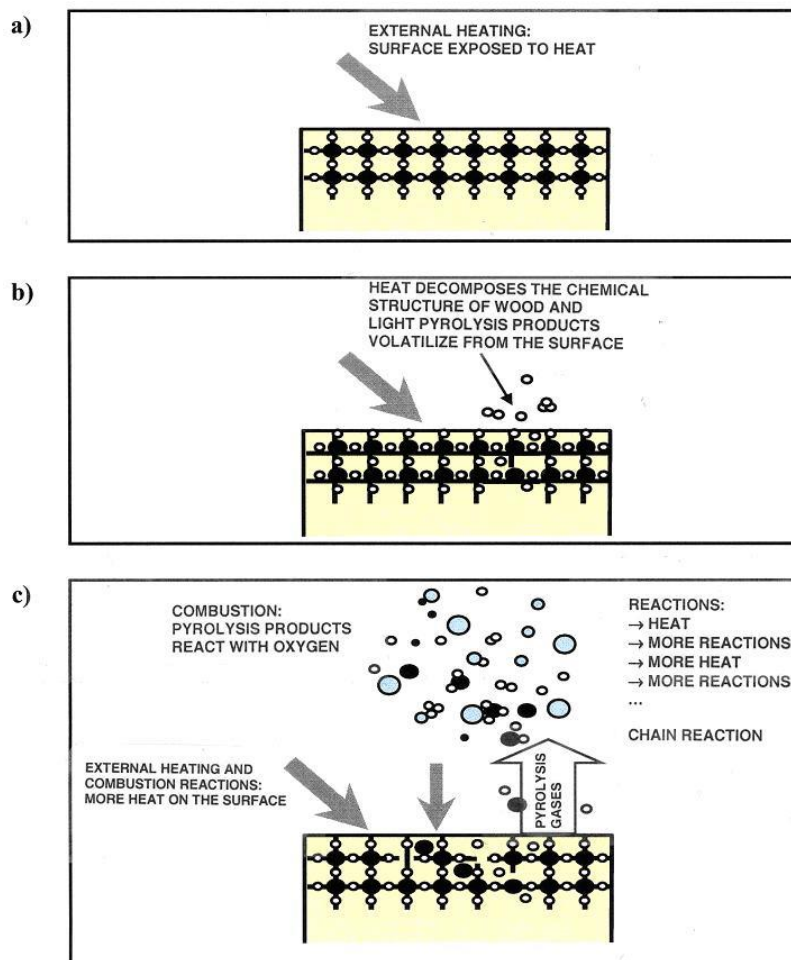
4.5.3 Proces hoření dřeva

Proces hoření je určen fyzikálními vlastnostmi daného dřeva. Fyzikální vlastnosti jsou rozhodující pro vystižení charakteristik u hořlavosti dřeva. Mezi ně řadíme především rychlost hoření, teplotu hoření, zápalnost, možnost šíření plamene a jiné charakteristiky. Do určité míry ovlivňuje proces a výpočty hoření i anatomická struktura dřeva, jako je chemické složení a hustota dřeva.

Spalování dřeva se staví především na pyrolýze (tj. tepelném rozkladu) reakcí produktů pyrolýzy a celulózy společně s plyny ve vzduchu, hlavně s kyslíkem. Pokud dojde ke zvýšení teploty, celulóza začne pyrolyzovat. Během procesu jsou produkty rozkladu uvolňovány jako plyn, nebo zůstávají v materiálu. S kyslíkem reagují uvolněné plynné látky a tím dochází k uvolňování značného množství tepla, které poté přivodí

reakce pyrolýzy a hoření. Proces hoření a pyrolýzy je vyobrazen v obrázku 6, který popisuje:

- a) Vnější ohřev zvyšující teplotu dřeva.
- b) Dále dochází ke spuštění pyrolýzy a k rozkladu chemické struktury dřeva. Jednoduché látky pyrolýzy prchají z povrchu dřeva.
- c) Dochází k hoření. U produktů pyrolýzy dochází k reagování s kyslíkem a začínají produkovat více tepla, což zapřičiňuje silnou rostoucí řetězovou reakci.



Obr. 9 Schéma procesu pyrolýzy a hoření dřeva.

Zdroj: (InnoFireWood)

Splanutí dřeva můžeme rozdělit do čtyř fází:

- Fáze 1: Vysušování dřeva

Během této fáze dochází k odpařování jak vody volné, tak i vázané, což napomáhá ke zvětšení vnitřního povrchu dřeva. Zvětšený povrch dřeva se následně dostane do styku

s kyslíkem. Tento proces se uskutečňuje za dlouhodobého působení termické zátěže na dřevo, při teplotách v rozmezí 80-120 ° C. Výsledkem této fáze je tvorba trhlinek, vytékání pryskyřice a menší změna barvy dřeva. K mírným změnám dochází i ve hmotnosti dřeva. Mechanické vlastnosti jsou však nezměněny. Po dokončení tohoto procesu dojde k fázi 2.

- Fáze 2: Odpařování uhlíkových sloučenin

V této fázi už je dosahováno vyšších teplot, a to kolem 150-200° C. Dochází k postupnému rozkladu chemické struktury dřeva, přesněji k dehydrataci polysacharidů (celulózy a hemicelulózy). Nastává zde výraznějších změn barvy a zhoršení mechanických vlastností, zejména houževnatosti. Během tohoto procesu však nenastává významnější uvolňování hořlavých plynů, které by mohly tvořit plamen.

- Fáze 3: Depolymerizace

Jedná se o pyrolýzu polysacharidů a ligninu, k čemuž dochází během teplot dosahujících 220° C a více. Dopadem toho je vznik plynů jako je vodík, oxid uhelnatý, aldehydy, ketony, methan a jiné. Vznik plamene je docílen reakcí vzniklých plynů s kyslíkem. V této fázi nastává k výraznějšímu zhoršení mechanických vlastnosti, především pevnosti dřeva.

- Fáze 4: Samovolné žhnutí

K samovolnému hoření bez plamene, nebo žhnutí dochází při překročení teploty 350° C a postačujícím přísunu kyslíku. Žhnutí se vyskytne u dřevěného uhlí, jehož vznik je právě díky termické degradaci dřevní hmoty, tedy pyrolýzy. Během této fáze dojde k uvolnění další energie, využitě na pyrolýzu vnitřních vrstev dřeva. Na konci tohoto procesu zůstane dřevěný popel, tedy konečný produkt spáleného dřeva. Jde o anorganický zůstatek procesu hoření (Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 2005).

Proces hoření můžeme tedy shrnout jako chemickou reakci, během které se uvolňuje teplo a světlé záření. Vzniknutý plamen, který můžeme rozdělit na dva druhy (horký a studený) vzniká především díky oxidační reakci. Horký a studený plamen rozlišujeme v závislosti na stupni oxidačních reakcí. Studený plamen je spojitý se středním stupněm, zatímco horký plamen spojujeme se stupněm konečným. Právě s horkým plamenem se uvažuje během požáru.

4.5.4 Vlivy hoření dřeva

Už výše jsme si uvedly, že mezi hlavní vliv působící na hořlavost dřeva je chemická struktura. Avšak nejde o jediný vliv hoření dřeva, spadají sem i další faktory:

- vnitřní složení dřeva, jako je pórovitost, podíl letního a jarního dřeva, hustota, propustnost kapalin a plynů atd. (druh dřeva),
- geometrie dřeva, tedy jeho velikost, tvar, druh povrchu, trhliny, poměr povrchu k objemu, podíl bočních a čelních ploch apod.,
- výskyt nápomocných látek, jako jsou lepidla, laky, nátěrové přípravky, retardéry hoření apod.,
- vlastnosti okolního prostředí, tj. relativní vlhkost vzduchu a teplota, složení vzduchu, rychlost proudění apod. (Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 2005).

4.6 Ochrana dřeva vůči ohni

Pro ochranu dřeva vůči ohni existuje více variant, jak kladně ovlivnit proces hoření. Pomocí chemických prostředků, kterých existuje mnoho, můžeme dosáhnout ke snížení hořlavosti nebo k částečnému omezení rychlosti a přenosu šíření ohně po povrchu dřeva. Možnost snížení rychlosti šíření vzniklého ohně je však omezena, dnes jde o přibližně 10 až 15 min. Za použití těchto látek se tedy dřevo nestane zcela nehořlavým nebo odolným vůči dlouhodobému namáhání vysokými teplotami. Degradace se jen zpomalí, a to na rychlost od 30 do 60 mm za hodinu do hloubky daného dřeva. To však dokazuje, že je ošetřená dřevěná konstrukce výrazně odolnější ve srovnání například s ocelovými, jejichž pevnost se zcela ztrácí hned po zahřátí na teplotu vyšší jak 400 až 450° C, kde dochází ke změně krystalické struktury (Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 2005).

4.6.1 Ochrana dřeva tepelně izolujícími prostředky

Obalením dřeva vhodnými izolačními hmotami dochází k zabránění k zahřívání na vysoké teploty, a tím i k odkladu vzniku hořlavých plynů. Běžně je používáno nehořlavé obložení s nízkou tepelnou vodivostí, jako je písek, popel, šterk či škvára. Dále se používá vápenná malta, která je omítnuta na povrch nebo obalení skelnou či čedičovou vatou.

Jedním z nejsnazších a téměř nejúčinnějších z používaných jsou tzv. zpěnitelné nátěrové hmoty, u kterých vzniká za působení vysokých teplot na povrchu materiálu vrstva nehořlavé tepelně izolující pěny. Nedostatkem této metody je však jeho použití z hlediska vizuálního či konstrukčního. Dále také dochází k jeho odpadávání tlusté ochranné vrstvy od povrchu z důsledku mechanického poškození nebo stárnutí materiálu (Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 2005).

5 Vliv antipyrénů na ochranu dřeva

Hlavním cílem ochranných povrchových úprav pomocí antipyrénů, je docílení vyšších a lepších fyzikálních vlastností chráněného materiálu. Nejpoužívanějšími produkty na ochranu dřeva proti ohni jsou směsi na bázi fosforečnanu a síranu amonného, tedy antipyrény. Dalším produktem na ochranu dřeva vůči ohni jsou sloučeniny boru, a to kyselina boritá, borax a jejich směsi. Antipyrény neboli zpomalovače hoření přispívají k výraznému zlepšení požárních vlastností dřeva. Všeobecně platí, že množství použitého antipyrénu (retardéru hoření), který dřevo pojme je přímo úměrné k jeho zlepšených vlastností odezvě k ohni. Způsob aplikace retardéru hoření dělíme na tři hlavní způsoby:

- impregnace dřeva pomocí roztoku zpomalovače hoření,
- povrchová úprava materiálu,
- přidání zpomalovače hoření do systému lepidla (Grexa, a další, 2001).

Při použití retardéru hoření u dřeva se zlepšuje reakce vůči působení ohně, jako je například uvolňování tepla, zápalnosti a šíření plamene. Tím můžeme dosáhnout Eurokódu neboli té nejvyšší národní a evropské klasifikaci požáru pro hořlavé sortimenty.

Vlastnosti reakce na oheň ovlivněné antipyreny však nemohou výrazně ovlivnit značně rozvinutý oheň. Intumescentní barvy jsou jedinou výjimkou, u kterých může dojít k odložení času pro začátek zuhelnění, tedy dojde ke zvýšení požární odolnosti dřevěných produktů. Za použití antipyrénů na dřeviny nedosáhneme nehořlavých materiálů.

Při získání lepších vlastností pomocí antipyrénů se tyto vlastnosti mohou časem zhoršit, a to zejména u dřevěných konstrukcích vyskytujících se ve venkovních prostorech. Za působení vysoké vlhkosti dochází ve dřevě k migraci chemikálií retardérů hoření od středu k povrchu materiálu až dojde k vylouhování látek. Ke zvyšování hořlavosti dřevěné konstrukce může dojít i ve vnitřních prostorech za nízké venkovní vlhkosti, kde dochází k migraci chemických látek zpomalovače hoření od povrchu směrem k místům s nižší koncentrací více uvnitř materiálu.

5.1 Přehled přípravků na ochranu dřeva vůči ohni v ČR

V České republice jsou v současnosti nejvíce využívány vodné systémy retardérů hoření, které se zde buď vyrábějí nebo jsou dováženy. Tyto retardéry jsou tvořeny ve dvou základních verzích, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

5.1.1 Anorganické retardéry

Tyto nátěry jsou tvořeny z vodných roztoků složených z anorganických sloučenin, jako je fosforečnan amonný, chlorid amonný, síran amonný, chlorid vápenatý, kyselina boritá, borax, alkalické křemičitany (vodní sklo) aj.

Mezi jejich hlavní výhody patří velmi dobrá rozpustnost ve vodě a téměř snadný průnik do povrchových vrstev dřeva. Určitá část tohoto retardéru (chlorid zinečnatý a borité sloučeniny) tvoří i ochranu dřeva vůči biotickým činitelům.

Nevýhodou tohoto retardéru je kratší životnost ve srovnání s jinými druhy nátěrů. Kratší životnost platí pro povrchovou úpravu, při úpravě hloubkové je účinnost retardéru vysoká, a i jeho životnost ochrany je téměř neomezená, tedy bez potřeby obnovy. Nevýhodou je tedy snadná vyluhovatelnost ze dřeva pomocí vody, uvolněný korozní účinek většina z nich na vlastní dřevo či kovový materiál.

Ochranné vlastnosti těchto látek závisí především na spotřebě tepla potřebného k jejich rozkladu, tedy ochlazení dřeva k oddálení jeho vzplanutí, dále na vývinu určitého množství nehořlavých plynů (vodní páry, dusíku, amoniaku, oxidu uhličitého aj.) čímž dochází k zředění pyrolyzních plynů pod zápalnou koncentrací, a také u povrchu dřeva ke zmenšení koncentrace kyslíku a poslední závislostí je vznik nehořlavé tepelně izolující vrstvy (dřevěného uhlí) a katalýze zuhelnatění povrchu (fosfátové a sulfátové anionty) na povrchu dřevěného materiálu (Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 2005).

5.1.2 Zpěňující (intumescentní) nátěry

Jde o jednosložkové či dvousložkové zpěňující (pěnové) retardéry, které jsou na bázi umělých pryskyřic (PVAc, MF-pryskyřice aj.) s přídavkem (polysacharid, pentol, močoviny aj.) a s dalšími pomocnými látkami (melamin, fosfáty amonné aj.). Tyto nátěry

jsou vodou ředitelné. Při zvýšení a působení teploty na materiál (cca nad 150° C) nebo hned při procesu hoření, dojde působením vysokých teplot k vytvoření tlusté (několik cm) nehořlavé mikroporézní pěny, která má tepelně izolující účinky. Tato pěnová vrstva vytvořena na povrchu chráněného materiálu dokáže poměrně dlouho odolávat ohni a sálavému teplu, a to v rámci až 30 minut. Zpěňující nátěry mají výrazně vyšší účinnost a delší životnost než přípravky na bázi anorganických solí.

Hlavními nevýhodami těchto látek je potřeba k dosažení účinné ochrany dřeva nanesení dostatečné a souvislé vrstvi nátěru, tak aby došlo k úplnému zakrytí přirozeného povrchu a tím i vzhledu dřeva. Dále tyto nátěry nejsou možné použít pro hloubkovou impregnaci dřeva a jeho cena je vyšší ve srovnání s jinými přípravky, avšak jeho účinnost a životnost tento nedostatek kompenzuje.

Výběr vhodného retardéru je důležitý v závislosti na konkrétním materiálu (konstrukci) a také v jakém prostředí se daný materiál nachází. Důležitým parametrem, který se musí brát v úvahu je jaký stupeň ochrany vůči ohni je v určitém prostředí nutný použít, nutnost dosažitelného stupně ochrany na počtu vrstev nátěru, vhodnou životnost ochrany a jiné technologické a technické vlastnosti daných přípravků (Najmanová, 2013).



(a)



(b)

Obr. 10 Pěnová vrstva vzniklá pomocí intumescentními nátěry.

Zdroj: (Eremina, a další, 2020)

5.2 Použití antipyrénů

Téměř hlavním použitím dřevěných produktů ošetřených retardéry hoření jsou obklady vnitřních i venkovních budov. U obkladů vyšších a větších budov je vyžadována vylepšená třída reakce vůči ohni, spadají sem například únikové cesty, veřejné budovy, byty nacházející se ve vyšších patrech budov, sportovní a montážní haly (Jones, 2017).

6 Metodika

Zkušební postupy, podle kterých se testování provádí se řídí podle norem EU. Tyto normy jsou velice přesné, a to díky svému vědeckému a přesnému postupu zhotovení zkoušky. Pro měření požární odolnosti byl vybrán postup neboli metodika, která se provádí podle normy (ČSN 73 0862/B-2, 1991). Tato norma se využívala pro stanovení stupně hořlavosti u stavebních materiálů, než ji nahradila nová evropská norma. Tuto normu jsme zvolili z důvodu snazšího a dostupného testování.

Metoda tohoto testování je založena na plynovém hořáku, který působí na testované těleso. Působení hořáku na těleso je 30 min. Zkušební těleso se umísťuje do držáku do vodorovné polohy. Působící plamen je umístěn tak, aby působil do středu daného zkušební vzorku. Vzdálenost mezi tělesem a okrajem hořáku je 10 cm.

V závislosti na postupu a způsobu měření, můžeme metodiku rozdělit na tyto kroky:

- příprava zkušebních těles
- značení zkušebních těles
- měření a vážení těles
- tepelná úprava zkušebních těles
- chemická analýza těles
- nanášení retardérů
- zkouška požární odolnosti
- vyhodnocení výsledků

7 Metodika experimentální části

Zvolená metodika pro toto testování požární odolnosti dřevin, byla zvolena podle normy ČSN 73 0862/B-2 (1991), která byla v našem případě poupravena. Jak již bylo zmíněno v této kapitole, jedná se o normu, která stanovuje stupně hořlavosti stavebních materiálů.

7.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební vzorky byly zhotoveny ze dřeviny javoru (*Acer*) o rozměrech 100 x 100 x 20 mm. Tato vybraná dřevina pochází z našich lesů a je specifická svým světlým zbarvením. Javorové dřevo je tvrdé a lesklé, jde o dobře opracovatelný materiál a moření či přijímání lepidla jde bez problému. Díky své tvrdosti a odstínu dřeva je tato dřevina využívána například pro výrobu hraček, řezbářství nebo velmi žádané nábytkářství.

Zhotovených vzorků bylo v počtu 60 - ti těles, které byly rozděleny do tří skupin po 20 vzorcích. První skupinou byly vzorky bez nánosu ochrany retardačním přípravkem, druhá skupina je ošetřena pomocí syntetického retardéru a poslední skupina vzorků je ošetřena retardérem přírodním. Před testováním došlo k vysušení vzorků, které probíhalo v sušárně ULM 400 při teplotě $t = 103 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Díky vysušení došlo u vzorků ke sjednocení vlhkosti na 12 % a tím k získání stejných počátečních podmínek. Všechny tyto vzorky absolvovaly teploty termické modifikace po 5- ti kusech v teplotních rozdílech 160 $^{\circ}\text{C}$, 180 $^{\circ}\text{C}$, 210 $^{\circ}\text{C}$ a bez termické modifikace 20 $^{\circ}\text{C}$.

7.2 Značení zkušebních těles

Po prvním kroku se jsme vzorky označili druhem dřeviny/stupněm termické modifikace/použitým typem retardéru či bez retardéru/číslem vzoru. V tomto případě například J/160/F/1.

7.3 Měření a vážení zkušebních těles

Po označení všech vzorků byly vzorky naměřené a zvážené na laboratorní váze MS 1602S s přesností 0,01 g. Z těchto hodnot jsme získali hodnoty pro výpočet výsledné hustoty, které jsou zobrazeny v tab. 2.

Tab. 2 Hustota těles bez použití retardéru před a po termické úpravě

Teplota modifikace vzorků (°C)				
	20 °C	160 °C	180 °C	210 °C
Hustota před modifikací (kg/m ³)	640	631	574	507
Hustota po modifikací (kg/m ³)	640	566	535	399

Zdroj: vlastní

7.4 Tepelná modifikace zkušebních vzorků

Dřevěné vzorky z javorového dřeva se pomocí 3 stupňů úpravy (160 °C, 180 °C a 210 °C) termicky modifikovaly. Postup této modifikace probíhal dle metody ThermoWood®. Celkový proces tepelné modifikace zkušebních vzorků můžeme rozdělit do tří kroků:

1. Ohřev a sušení

Prvním krokem tohoto procesu je rychlé zvyšování teploty na 100 °C, aby došlo k působení páry. Poté rychlost nárůstu teploty postupně klesá a dostává se na výšky 130 °C. Za tohoto kroku dochází k vysušení dřeva na téměř nulovou vlhkost.

2. Termická modifikace

Druhý krok už spočívá v termické modifikaci, kde teplota dosahuje teploty 185-230 °C po čas 2 až 3 hodin. Doba působení a velikost teploty je určena podle požadavků ThermoWoodu.

3. Ochlazování a klimatizace

Posledním krokem tohoto procesu bylo chlazení a klimatizování tepelně upraveného dřeva, kde dochází k postupnému ochlazování na teplotu v rozmezí 80-90 °C a k ustálení vlhkosti na výslednou hodnotu 4 až 7 %.

7.5 Chemická analýza vzorků

Za účelem zjištění chemického složení všech vzorků se testovaná tělesa mechanicky zpracovaly na podobu pilin, které dosahovali velikosti frakce 0,5 až 1 mm. Tyto piliny byly extrahovány v Soxhletově aparátu za pomoci směsi ethanolu a toluenu vytvořené podle metody ASTM D1107-96. Za pomoci metody ASTM D1106-96 jsme zjistili obsah ligninu a podle metody autorů (Wise, a další, 1946) jsme dospěli k získání obsahu holocelulózy. Za použití Seifertovi metody jsme zjistili obsah celulózy a zároveň odchylku mezi celulózu a holocelulózu jako úroveň hemicelulózy. Veškerá měření se uskutečnila u každého vzorku 4krát.

7.6 Nanesení syntetického retardéru hoření

Pro testování byl použit syntetický antipyrin pod názvem Flamgrad, který je vyráběný na Slovensku pod firmou Stachema. Jde o zpěnitelný vodou ředitelný protipožární nátěr. Aplikace se provádí ve dvou vrstvách při teplotě 20 °C pro zasychání, kde ke druhému nátěru dochází po 12 hodinách. Jedná se o nátěr s obsahem koksotvorné složky, kyseliny fosforečné, napěňujících složek, aditiv, pojiva a pomocných látek. Při styku tohoto nátěru s ohněm dojde k vytvoření silné nehořlavé tepelně izolující vrstvy na povrchu chráněného materiálu. Vzniklá vrstva zapříčiní zpomalení procesu hoření a zároveň chrání dřevěný materiál vůči působení ohně a sálavým teplem.

7.7 Nanesení přírodního retardéru hoření

Jako přírodní retardér hoření se v této práci použil arabinogalaktan. Jedná se o hemicelulózy, u kterých je jejich velký výskyt především v primárních a sekundárních

buněčných stěnách rostlinných buněk. Arabinogalaktany se téměř ve všech rostlinách nacházejí v kovalentní asociaci s proteiny, jako glykoproteiny či proteoglykany. Jde o látky rozpustné ve vodě, které se mohou izolovat z dřeviny modřínu ve množství 10 až 20 % (Gaff, a další, 2019).



Obr. 11 Vysušování naneseného retardéru na zkušebních vzorcích

Zdroj: vlastní

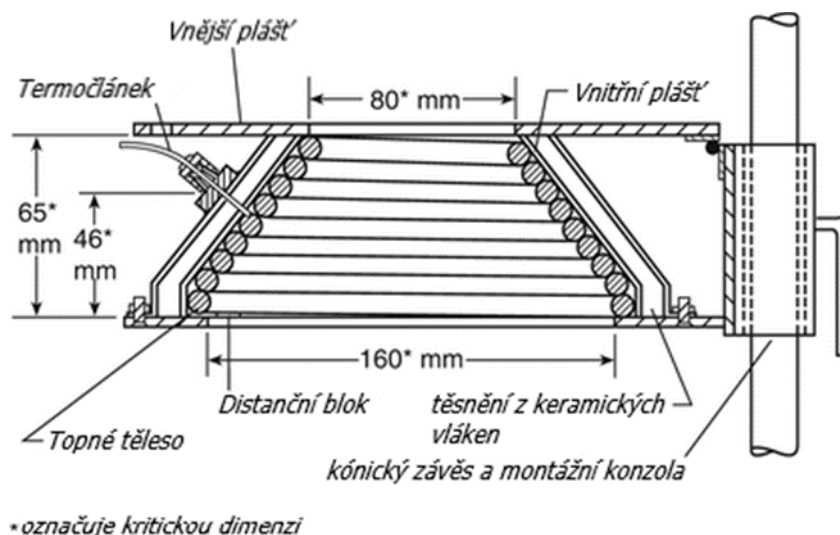
7.8 Zkouška požární odolnosti

Zkouška požární odolnosti se prováděla na kónickém kalorimetru, který se využívá pro zjištění lepších vědeckých znalostí ohledně parametrů u požárních odolností. Zjištěné parametry mohou být čas zapálení vzorku působením tepelného toku na kónickém kalorimetru, tvorba kouře, rychlost (Heat Release Rate – HRR) a množství uvolňování tepla a ztráta hmotnosti na daném vzorku, vznik oxidu uhličitého a uhelnatého. Tyto data jsou velmi důležité pro vědecký rozvoj v poznání vlastností u spalování a reakcí na oheň u různých druhů materiálů (ISO 5660-1:, 2002)

7.8.1 Části kónického kalorimetru

V této části budou popsány hlavní části kónického kalorimetru, které jsou nutné znát pro provádění testů.

- a) Topné těleso – tato část je složena z tyčového topného tělesa, které je navinuté do tvaru kužele a jeho příkon je vyměřený na 5 kW. Pomocí dvoustěnného kuželovitěho pláště z nerezové oceli je topné těleso uzavřeno před externím prostředím. Obsahem této části je také žáruvzdorný vláknitý materiál o hustotě cca 100 kg/m^3 , který se nachází mezi dvěma stěnami externího pláště. Na povrchu vyhřívané spirály se nachází tepelný regulátor a tři termočlánky, které pomáhají udržovat teplotu spirály a vyzařování tepelného toku. Topná spirála musí dokázat ozářit zkušební produkt tepelným tokem, který dosahuje vysokých (Narodoslawsky, a další, 2008).



Obr. 12 Schéma topného tělesa

Zdroj: (ISO 5660-1:, 2002)

- b) Vážicí část – tato váha slouží k záznamu prvotní hmotnosti zkušebního tělesa, a také k zjištění úbytku hmotnosti za dobu zkoušky. Přesnost váhy musí být nastavena na $\pm 0,1 \text{ g}$.
- c) Držák zkušebního vzorku – držák je miskového čtvercového tvaru, který je vyrobený z korozi vzdorné oceli a ve spodní části držáku se nachází žáruvzdorný vláknitý materiál, jehož hustota je nízká. Povrch vzorku od ohřívaného tělesa musí být vzdálený na ustálených 25 mm.

-
- d) Přístroj na odvod a měření průchodu spalin – proces je sestaven z odsávacího zvonu, nasávacího a výtlačného potrubí, vysokoteplotního odstředivého ventilátoru a clonkového průtokoměru.
 - e) Sledování tepelného toku – tato část je určena k nastavení tepelného toku, která se používá před určitou zkouškou. Během seřizování tepelného toku musí docházet k ochlazení radiometru vodou
 - f) Iniciátor – jde o přístroj, jehož je složený ze zapalovacích elektrod napájecích z 10 kV transformátoru, který je vytvořen na principu jiskrového zapalování. U konce zapalovacích elektrod je zapotřebí mezery o velikosti 3 mm. Při zkoušení vodorovného vzorku se zapalovací elektroda nastavuje tak, aby se jiskřiště pohybovalo 13 mm nad středovým bodem zkoušeného prvku.

Součástí kónického kalorimetru je i počítač se softwarem, zařízení určené k odběru vzorků plynu, analyzátor jak oxidu uhličitého, tak i uhelnatého, analyzátor kyslíku, ventilátor, termočlánek nacházející se ve výtlačném potrubí, kalibrační hořák, soustava na sbírání a analýzu dat a nepovinných bočních clon (ISO 5660-1:, 2002).

7.8.2 Kalibrace kónického kalorimetru

Zkouška požární odolnosti byla provedena na kónickém kalorimetru podle normy (ISO 5660-1, 2015), kde byla prvním krokem kalibrace stroje. Kalibrace je proces, během kterého dojde ke spuštění stroje a k zahřívání zářiče společně s chlazením. Následně čekáme na ustálení požadované hodnoty teplotního zářiče. Jako první kalibrace je kalibrace rychlosti uvolňování tepla, po které můžeme stanovit stálou clonu C. Následuje puštění metanu do kalibračního hořáku, který necháme po dobu 3 minut konstantně hořet poté začíná zaznamenávání dat po 5 sekundách po dobu dalších 3 minut. Po tomto procesu kalibrace následuje kalibrace ohříváče, který se kalibruje za pomoci řízeného ozáření, pro požadovanou přesnost ozáření $\pm 2 \%$. Během kalibrace nesmí dojít k narušení testovacího prostředí. Kužel se ohřívá po dobu přibližně 10 minut za stálých hodnot. Poté následuje kalibrace kyslíku po danou 30 s, u které jsme dosáhli požadované hodnoty 20,95 %. Po tomto procesu následuje kalibrace hmotnosti, kdy na držák umístíme závaží, které 4krát převážíme pro dosažení shodné hmotnosti. Po dosažení všech těchto procesů následovalo samotné testování vzorků.

Vzorek jsme umístili do držáku kalorimetru, který jsme pomocí ochranných rukavic vložili do kónického kalorimetru. Test započal pálením vzorku. Minutu po zahájení testování byl zahájen trvalý plamen, během kterého se automaticky zaznamenávaly data požárních charakteristik. Testování jednoho vzorku trvalo po dobu 30 minut.



Obr. 13 Testování na kónickém kalorimetru.

Zdroj: vlastní

7.9 Výpočet získaných hodnot

Vzorec pro výpočet hustoty, který se provedl před i po testování se stanovil dle (ISO 13061-2 , 2014).

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

kde:

- ρ_w – hustota tělesa při obsahu vlhkosti w (kg/m^3),
- m_w – hmotnost tělesa při daném obsahu vlhkosti w (kg),
- V_w – objem tělesa při daném obsahu vlhkosti w .

Podle (ISO 13061-1 , 2014) byl stanoven výpočet pro obsah vlhkosti ve vzorcích před a po testování.

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

kde:

- w – obsah vlhkosti v tělese (%)
- m_w – hmotnost tělesa, při dané vlhkosti w (kg),
- m_0 – hmotnost tělesa, při nulové vlhkosti (kg).

Sušení se postupilo podle (ISO 13061-1 , 2014).

Důležitým hodnotícím výsledkem je úbytek hmotnosti testovaných vzorků, ke kterému se došlo podle rovnice:

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

kde:

- Δm – ztráta hmotnosti tělesa (%),
- m_1 – hmotnost tělesa před danou zkouškou (g),
- m_2 – hmotnost tělesa po zkoušce (g).

Vzorec pro rychlost odhořívání se stanovil ze vztahu:

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

kde:

- m_t – je hmotnost tělesa (g) v čase t ,
- $m_t + 10$ – je hmotnost tělesa (g) o 10 sekund déle,
- m_{t0} – je hmotnost tělesa (g) za čas 0.

7.10 Vyhodnocení získaných výsledků

Pomocí analýzy rozptylu ANOVA a Fišerova F-testu s použitím softwaru Statistica 12 (Statsoft Inc., USA) byl určený vliv mající jednotlivé faktory na protipožární charakteristiky. Pro srovnání požárních charakteristik se provedla analýza rozptylu ANOVA a Spearmanova korelace.

Za pomoci analýzy v softwaru Statistica 12, jsme dostali statistické zhodnocení získaných výsledků. V závislosti na této analýze rozptylu jsme získali zhodnocení účinků samostatných faktorů. Získali jsme také zhodnocení vzájemné kombinace mezi samostatnými faktory a účinky, u kterých jsme použili Fischerův F test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Hladinu významnosti získáme pomocí hodnoty P, podle této hodnoty můžeme zkoušený faktor vyhodnotit podle následujících bodů:

- * $P = 0$ 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 (Gaff, 2009).

8 Výsledky

8.1 Úbytek hmotnosti vzniklý vlivem hoření

V následující tabulce 3 jsou znázorněny průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro úbytek hmotnosti jak u dřeva termicky ošetřeného, tak u dřeva neošetřeného a s aplikací daného retardéru hoření či bez něj.

Tab. 3 Průměrné hodnoty úbytku hmotnosti nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem

Použití retardéru hoření	Tepelná modifikace (°C)	Úbytek hmotnosti (g/m^2)	CV (%)
Bez retardéru	20	11247	3
	160	8980	23
	180	10966	1
	210	9018	7
Syntetický retardér	20	7955	3
	160	6336	23
	180	7752	2
	210	6392	6
Přírodní retardér	20	10101	5
	160	7950	23
	180	9958	2
	210	8117	7

Zdroj: vlastní

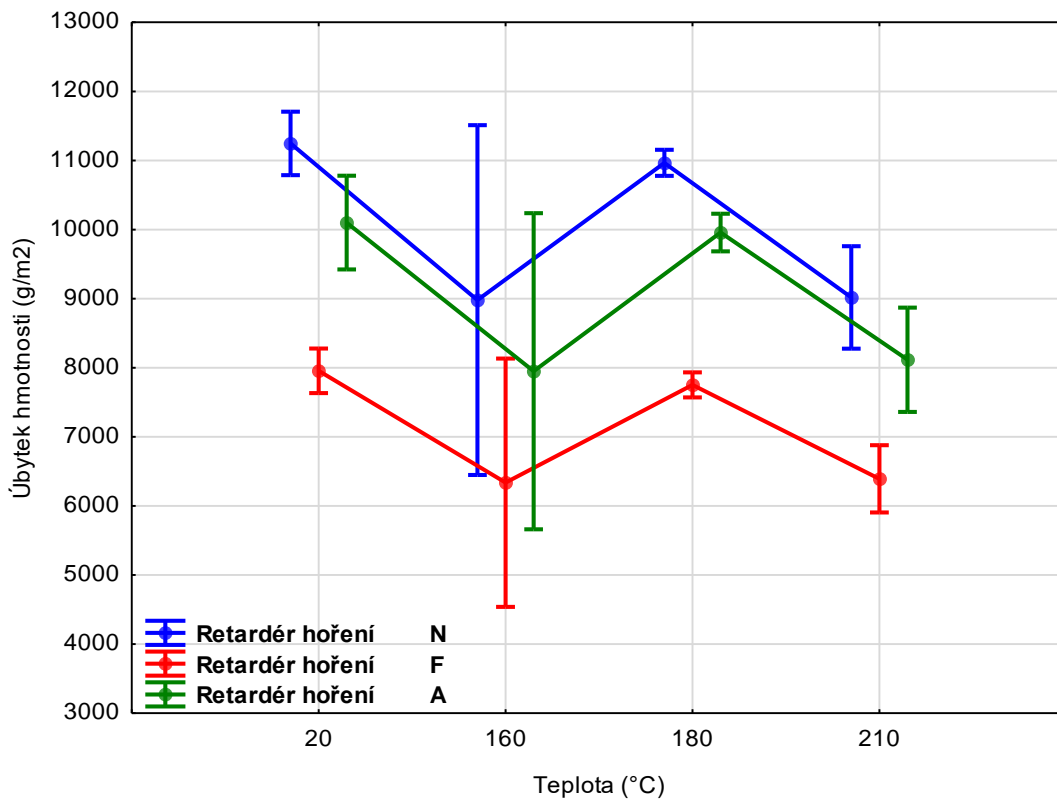
V tabulce 4 jsou znázorněné zkoumané faktory pro úbytek hmotnosti v závislosti na daných faktorech. Hladina významnosti je zde $P = 0,05$. Na základě hodnot hladiny významnosti „P“ můžeme tvrdit, že byl potvrzen statisticky významný účinek u retardéru hoření a teploty, avšak u jejich interakce se statistický význam nepotvrdil.

Tab. 4 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na úbytek hmotnosti

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-Test	Úroveň významnosti P
Intercept	4,573771E+09	1	4,573771E+09	4932,873	0,000000
Teplota (°C)	5,252011E+07	3	1,750670E+07	18,881	0,000000
Retardér hoření	8,936820E+07	2	4,468410E+07	48,192	0,000000
Teplota (°C)*Retardér hoření	1,131563E+06	6	1,885938E+05	0,203	0,974103
Chyba	4,450571E+07	48	9,272023E+05		

Zdroj: vlastní

Na obrázku číslo 14 můžeme vidět, že použitý přírodní retardér dosáhl horšího výsledku v úbytku hmotnosti oproti syntetickému retardéru. U obou retardéru hoření došlo ke statistické významnosti u teplot termické modifikace mezi 180 °C a 210 °C. Stejně tak tomu bylo i u případu bez retardéru hoření. Vlivem faktoru tepelné úpravy došlo u všech typů vzorků k největšímu úbytku hmotnosti při teplotě tepelné modifikace 160 °C.



Obr. 14 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňující vliv tepla na úbytku hmotnosti při použití daných retardérů.

Zdroj: vlastní

8.2 Rychlost úbytku hmotnosti

V následující tabulce 5 jsou znázorněny průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro rychlost úbytku hmotnosti, jak u dřeva termicky ošetřeného, tak u dřeva neošetřeného a s aplikací daného retardéru hoření či bez něj.

Tab. 5 Průměrné hodnoty rychlosti úbytku hmotnosti nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem

Použití retardéru hoření	Tepelná modifikace (°C)	Rychlost úbytku hmotnosti (g/m^2s)	CV (%)
Bez retardéru	20	6	5
	160	7	18
	180	6	2
	210	5	5
Syntetický retardér	20	5	5
	160	5	18
	180	4	1
	210	4	4
Přírodní retardér	20	6	5
	160	6	18
	180	6	2
	210	5	5

Zdroj: vlastní

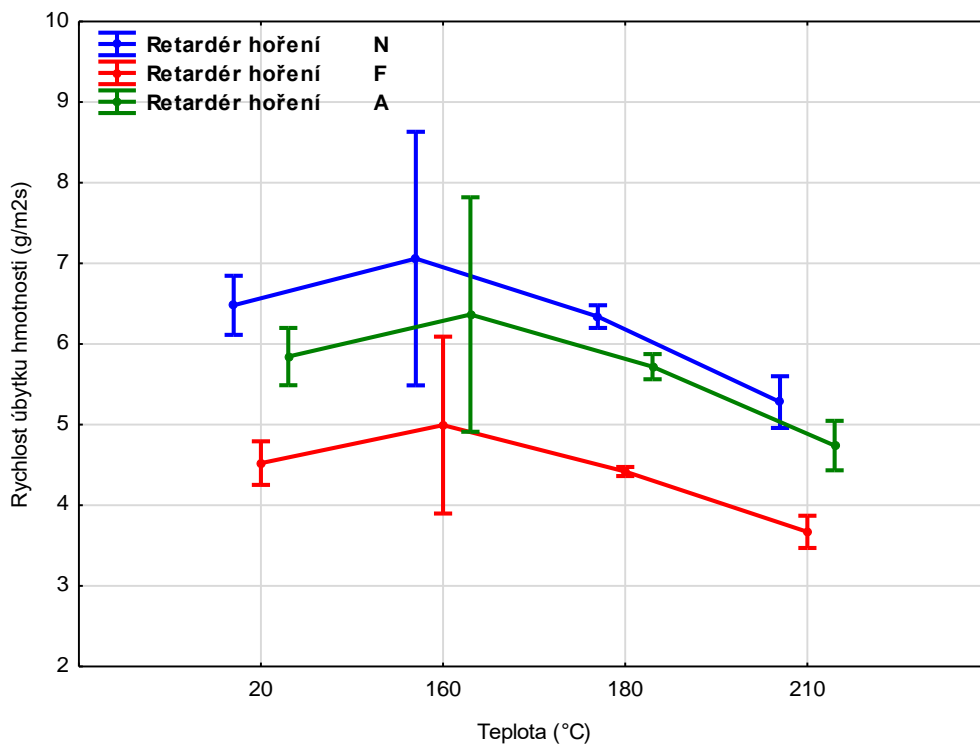
V tabulce 6 můžeme vidět zkoumané faktory pro rychlost úbytku hmotnosti způsobenou hořením s hladinou významnosti $P = 0,05$. Jak zde můžeme vidět $P = 0$ u jednotlivých faktorů, jedná se tedy o faktory statisticky působící, proto můžeme tvrdit, že měli vliv na rychlost úbytku hmotnosti. Avšak u interakce těchto faktorů nedošlo ke statistické významnosti.

Tab. 6 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na rychlost úbytku hmotnosti

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-Test	Úroveň významnosti P
Intercept	1784,205	1	1784,205	5151,729	0,000000
Teplota (°C)	19,365	3	6,455	18,638	0,000000
Retardér hoření	37,031	2	18,515	53,461	0,000000
Teplota (°C)*Retardér hoření	0,301	6	0,050	0,145	0,989184
Chyba	16,624	48	0,346		

Zdroj: vlastní

Na obrázku 15 je znázorněn vliv termické úpravy v závislosti na použití vybraného retardéru či bez jeho použití na rychlost úbytku hmotnosti. U použitých retardéru a či bez něj, můžeme konstatovat, že se jedná o statisticky významné hodnoty u teplot termické úpravy 180 °C a 210 °C. Nejrychlejší úbytek hmotnosti nastal při teplotě termické modifikace 160 °C u obou retardéru a u bez použití retardéru.



Obr. 15 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňuje vliv tepla na rychlost úbytku hmotnosti při použití daných retardérů.

Zdroj: vlastní

8.3 Maximální rychlost hoření

V následující tabulce 7 jsou znázorněny průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro maximální rychlost hoření, jak u dřeva termicky ošetřeného, tak i u dřeva neošetřeného a s aplikací daného retardéru hoření či bez něj.

Tab. 7 Průměrné hodnoty max. rychlosti nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem

Použití retardéru hoření	Tepelná modifikace (°C)	Max. rychlost (kW/m^2)	CV (%)
Bez retardéru	20	150	7
	160	211	36
	180	222	14
	210	139	5
Syntetický retardér	20	105	7
	160	150	37
	180	155	15
	210	97	6
Přírodní retardér	20	136	6
	160	190	36
	180	208	11
	210	124	6

Zdroj: vlastní

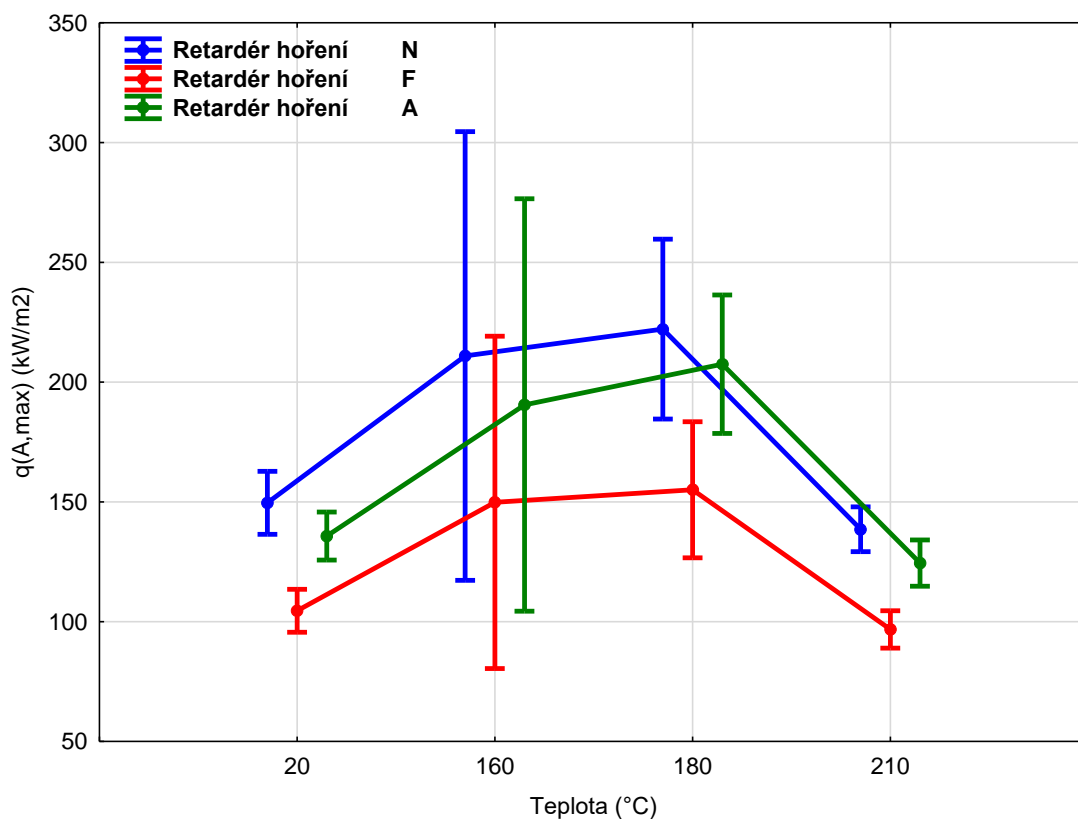
V následující tabulce 8 můžeme vidět, že u teploty je hladina významnosti v závislosti na daných hodnotách hladiny významnosti „P“ rovna 0, jde tedy o statisticky působící faktor, zatímco u retardéru hoření jde o statisticky velmi významný účinek. Avšak u jejich interakce nedošlo ke statistické významnosti.

Tab. 8 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na maximální rychlost hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-Test	Úroveň významnosti P
Intercept	1481595	1	1481595	1112,369	0,000000
Teplota (°C)	63821	3	21274	15,972	0,000000
Retardér hoření	30564	2	15282	11,474	0,000085
Teplota (°C)*Retardér hoření	1409	6	235	0,176	0,981996
Chyba	63933	48	1332		

Zdroj: vlastní

Působení tepelné úpravy s retardérem hoření na maximální rychlost hoření je znázorněno na následujícím obrázku 16. Statisticky velmi významné hodnoty podle dané hladiny významnosti „P“ se v tomto případě potvrdily u obou retardérů a bez něj za teploty 180 °C a 210 °C. Z tohoto působení vyšel syntetický retardér lépe oproti retardéru přírodnímu.



Obr. 16 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňuje vliv tepla na maximální rychlost hoření za použití daných retardérů hoření.

Zdroj: vlastní

8.4 Čas při $q(A, \max)$ (S)

V následující tabulce 9 jsou znázorněny průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro čas při maximální rychlosti hoření, jak u dřeva termicky ošetřeného, tak u dřeva neošetřeného a s aplikací daného retardéru hoření či bez něj.

Tab. 9 Průměrné hodnoty času při max. rychlosti nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem

Použití retardéru hoření	Tepelná modifikace (°C)	Čas při max. rychlost (kW/m^2)	CV (%)
Bez retardéru	20	150	7
	160	211	36
	180	222	14
	210	139	5
Syntetický retardér	20	105	7
	160	150	37
	180	155	15
	210	97	6
Přírodní retardér	20	136	6
	160	190	36
	180	208	11
	210	124	6

Zdroj: vlastní

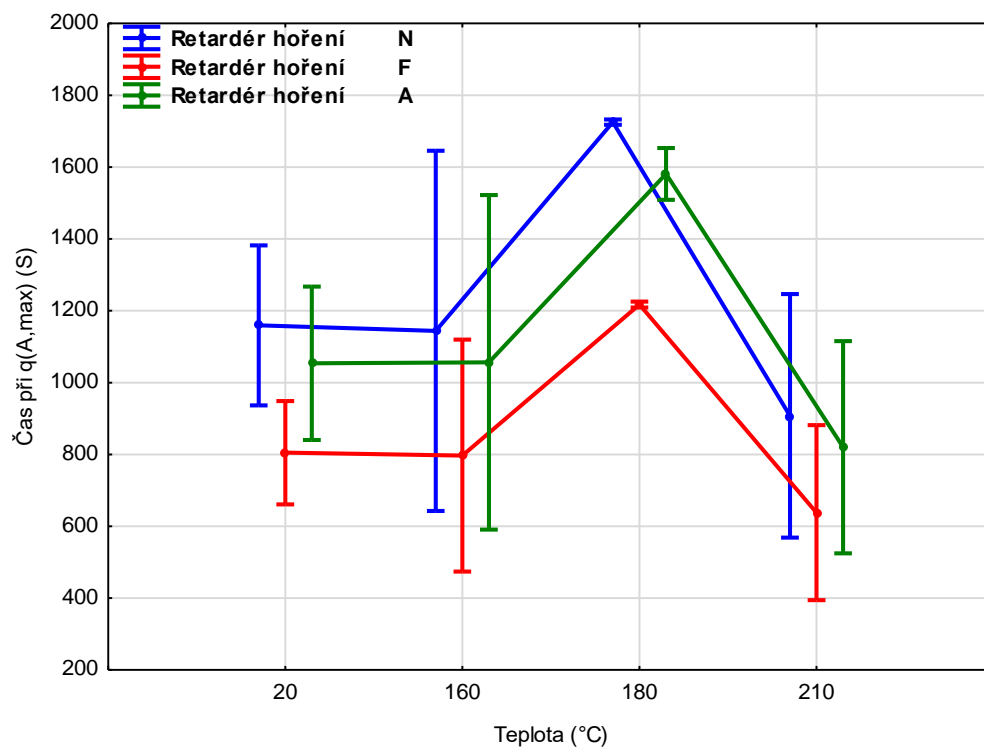
Tabulka 10 ukazuje, že na hladině významnosti $P = 0,05$ jde o statisticky významné hodnoty u faktoru teploty, zatímco u retardéru hoření jde o statisticky velmi významné hodnoty. Avšak u jejich interakce se významné hodnoty neprokázaly.

Tab. 10 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na čas při maximální rychlosti hoření

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-Test	Úroveň významnosti P
Intercept	69387415	1	69387415	1343,177	0,000000
Teplota (°C)	4200602	3	1400201	27,105	0,000000
Retardér hoření	1450056	2	725028	14,035	0,000016
Teplota (°C)*Retardér hoření	81645	6	13608	0,263	0,951220
Chyba	2479640	48	51659		

Zdroj: vlastní

Na grafu zobrazeném na obrázku 17 lze vidět výsledky vlivu termické modifikace a použití retardéru hoření či bez jeho použití na době maximální rychlosti. U přírodního retardéru hoření došlo ke statistické významnosti při teplotě termické modifikace 180 °C a 210 °C. Zatímco u teplot 160 °C, 180 °C a 210 °C došlo ke statistické významnosti u syntetického retardéru, stejně tak u typu bez použitého retardéru.



Obr. 17 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňuje vliv tepla na čas při maximální rychlosti za použití daných retardérů hoření.

Zdroj: vlastní

8.5 Celkové teplo

V následující tabulce 11 jsou znázorněny průměrné hodnoty s variačním koeficientem pro celkové teplo, jak u dřeva termicky ošetřeného, tak u dřeva neošetřeného a s aplikací daného retardéru hoření či bez něj.

Tab. 11 Průměrné hodnoty celkového tepla nemodifikovaného a termicky modifikovaného javorového dřeva s variačním koeficientem

Použití retardéru hoření	Tepelná modifikace (°C)	Čas při max. rychlost (kW/m^2)	CV (%)
Bez retardéru	20	199	7
	160	171	24
	180	212	4
	210	176	7
Syntetický retardér	20	141	5
	160	121	24
	180	148	4
	210	124	6
Přírodní retardér	20	180	7
	160	158	26
	180	194	5
	210	160	9

Zdroj: vlastní

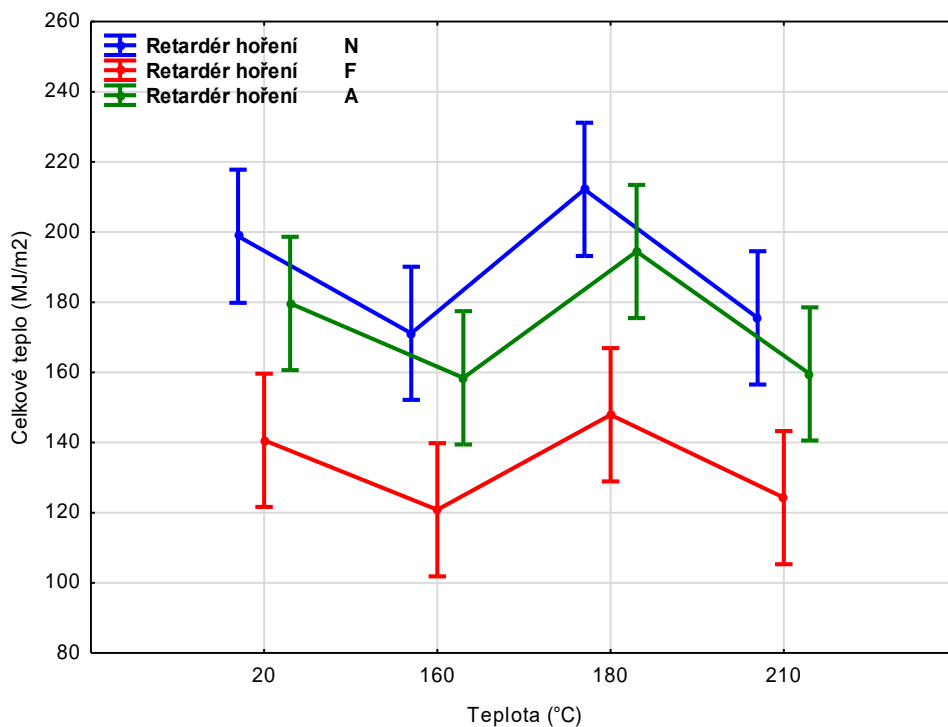
V tabulce 12 jsou zobrazeny hodnoty dle dané hladiny významnosti „P“ pro celkové teplo. U působení teploty dochází k velmi významné účinnosti, podobně jako vliv retardéru hoření, kde však dochází jen ke statistické významnosti. Interakce těchto dvou faktorů se jako statisticky významná neprokázala.

Tab. 12 Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce na celkové teplo

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fišerův F-Test	Úroveň významnosti P
Intercept	1639301	1	1639301	3674,032	0,000000
Teplota (°C)	12301	3	4100	9,190	0,000065
Retardér hoření	33151	2	16575	37,149	0,000000
Teplota (°C)*Retardér hoření	372	6	62	0,139	0,990373
Chyba	21417	48	446		

Zdroj: vlastní

Na grafu zobrazeném na obrázku 18 můžeme vidět výsledky vlivu termické modifikace a použití retardéru hoření či bez jeho použití na celkové teplo. Vliv jednotlivých faktorů a jejich interakce se v tomto případě neprokázal jako statisticky významný ani v jenom případě. Avšak nejlépe z této charakteristiky dopadl syntetický retardér.



Obr. 18 Graf 95 % intervalu spolehlivosti znázorňuje vliv tepla na celkové teplo za použití daných retardérů hoření

Zdroj: vlastní

8.6 Chemická analýza

Hodnoty s chemickým rozбором vzorků se nacházejí v tabulce 13. Vlivem tepelné modifikace došlo k výraznějšímu zvýšení obsahu extraktů u teploty 210 °C, k mírnému zvýšení u ligninu a celulózy také při teplotě 210 °C, zatím co u holocelulózy a hemicelulózy došlo ke snížení.

Tento chemický rozbor byl proveden na České zemědělské univerzitě v Praze, za pomoci doc. Milana Gaffa PhD.

Tab. 13 Chemický rozbor vzorků

Teplota (°C)	Extraktiva (%)	CV	Lignin (%)	CV	Holocelulóza (%)	CV	Celulóza (%)	CV	Hemicelulóza (%)	CV
20	2,48	5,18	20,74	1,28	79,49	0,51	46,39	0,62	33,09	2,02
160	2,97	4,41	21,03	0,97	78,24	0,55	47,03	0,37	31,21	1,22
180	4,46	4,05	21,47	1,61	74,14	0,39	48,31	0,60	25,84	2,09
210	7,64	4,31	25,59	1,06	65,37	0,52	55,31	0,45	10,06	5,79

* Hodnoty znázorňují střední procento hmotnosti sušiny v sušárně, CV (%) představuje variační koeficient.

Zdroj: vlastní

Statistické získané hodnoty vzaté z vlivu teploty na určitém množství dílčích chemických složek dřeva, které se posuzovali na hladině významnosti $P = 0,05$ se u veškerých sledovaných složek dřeva potvrdilo, že je faktor působení významný v závislosti na teplotě, jak můžeme vidět v tabulce 14.

Tab. 14 Dopad teploty na množství dílčích složek dřeva

Extraktivní látky (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	307,9148	1	307,9148	7053,839	0,000000
Teplota (°C)	65,0591	3	21,6864	496,800	0,000000
Chyba	0,5238	12	0,0437		
Lignin (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	7890,769	1	7890,769	103536,4	0,000000
Teplota (°C)	62,010	3	20,670	271,2	0,000000

Chyba	0,915	12	0,076		
Holocellulose (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	88347,16	1	88347,16	641873,2	0,000000
Teplota (°C)	489,07	3	163,02	1184,4	0,000000
Chyba	1,65	12	0,14		
Cellulose (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	38824,76	1	38824,76	603611,0	0,000000
Teplota (°C)	202,80	3	67,60	1051,0	0,000000
Chyba	0,77	12	0,06		
Hemicelluloses (%)					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	rozptyl	Fischerův F-test	Hladina významnosti P
Intercept	10038,54	1	10038,54	32879,77	0,000000
Teplota (°C)	1312,27	3	437,42	1432,71	0,000000
Chyba	3,66	12	0,31		

Zdroj: vlastní

Získané hodnoty korelačních koeficientů, které jsou zobrazeny v tabulce 15, zobrazují stupeň závislosti vzniklý mezi charakteristikami hoření a chemickými prvky dřeva.

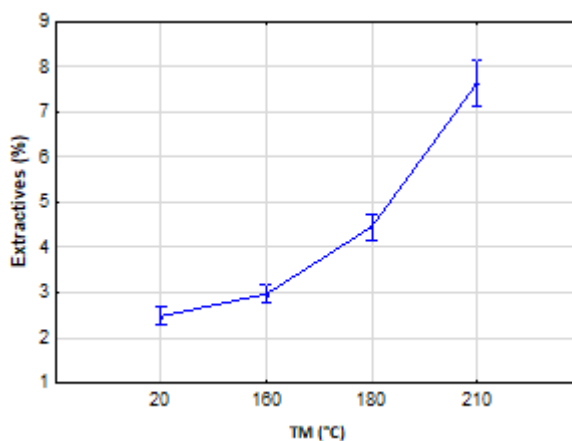
Tab. 15 Korelační koeficient určující charakteristiky mezi hořením a chemickou strukturou dřeva

	Extraktiva	Lignin	Holocelulóza	Celulóza	hemicelulóza
q(A,max) (kW/m²)	0,2778	0,2096	0,27276	0,2198	0,25299
Čas při q(A,max) (S)	0,1739	0,1283	0,17118	0,1349	0,15759
Celkové teplo (MJ/m²)	0,1759	0,1225	0,17937	0,1367	0,16327
Úbytek hmotnosti (g/m²)	0,10215	0,17728	0,1087	0,16000	0,1294
Rychlost úbytku hmotnosti (g/m²s)	0,0239	0,0873	0,02279	0,0746	0,04331

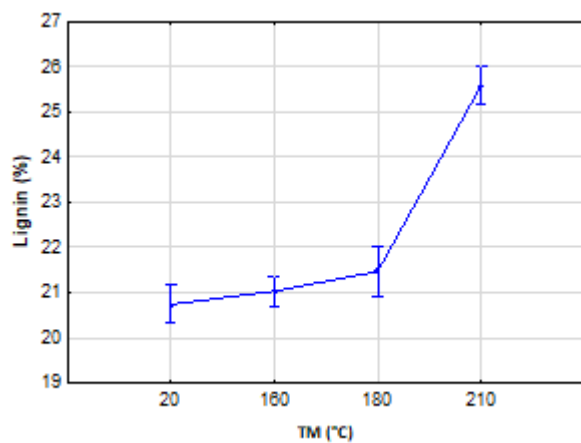
$r = 0$ – nezávislé; $0 < r \leq 0,3$ – nízká závislost; $0,3 < r \leq 0,7$ – střední závislost; $0,7 < r < 1$ – významná závislost; $r = 1$ – vysoká závislost.

Zdroj: vlastní

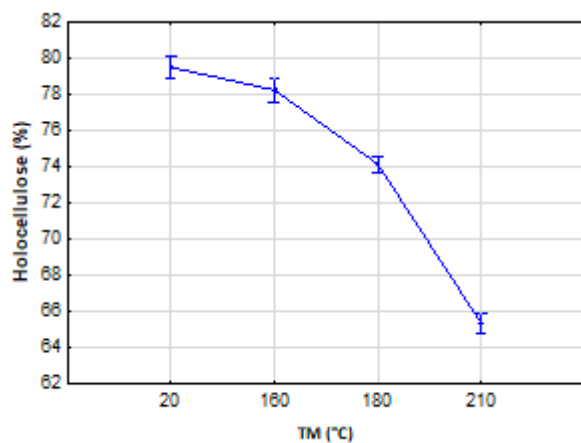
Následující obrázky grafů popisují závislost mezi tepelnou úpravou a základními chemickými složkami (extraktivní látky, lignin, celulóza, hemicelulóza a holocelulóza).



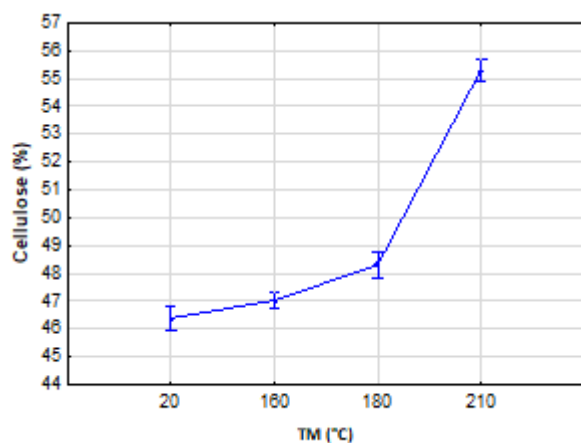
Obr. 19 Graf 95 % interval spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a extraktivními látkami.



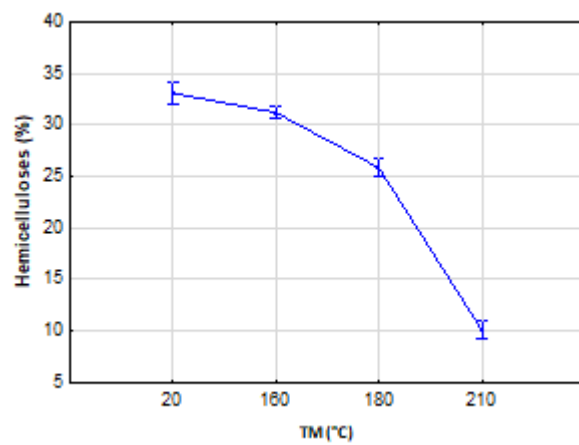
Obr. 20 Graf 95 % intervalu spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a ligninem.



Obr. 21 Graf 95 % intervalu spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a holocelulózou.



Obr. 22 Graf 95 % intervalu spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a celulózu.



Obr. 23 Graf 95 % intervalu spolehlivosti vlastností mezi tepelnou úpravou a hemicelulózou.

9 Výsledky a diskuse

V této práci byly zkoumány 3 druhy vzorků rostlého dřeva a dřeva s termickou úpravou. Vzorky jsme rozdělili podle způsobu použité ochrany vůči ohni, tedy vzorky s použitím syntetického (Flamgard) a přírodního (arabinogalaktant) protipožárního nátěru a vzorky bez použití ochrany. Testování se provádělo jak u dřeva rostlého, tak i u dřeva s termickou úpravou, která se prováděla ve 3 stupních úpravy (160°C, 180 °C a 210 °C). U těchto vzorků byl pozorován vliv této použité termické úpravy za použití protipožárních retardérů hoření a bez jeho použití na charakteristiky reakce na oheň a zapalitelnosti. Sledované vlastnosti byly vyhodnocovány za čas hoření kolem 1800 s, mezi sledované vlastnosti spadá rychlost hoření, maximální rychlost hoření, úbytek hmotnosti a maximální úbytek hmotnosti. Důležitým sledovaným parametrem byl úbytek hmotnosti během hoření, díky kterému jsme za pomoci rovnic (1), (3), (4) došli k výsledkům ostatních charakteristik reakce na oheň a zapalitelnosti, jako je rychlost a maximální rychlost hoření. Dalším sledovaným faktorem byla chemická analýza zkušebních vzorků, u které jsme zjistili vliv základních chemických složek dřeva (extraktivní látky, celulóza, lignin, hemicelulóza a holocelulóza) jak u dřeva rostlého, tak u dřeva s termickou úpravou. Tato sledovaná analýza byla důležitá ke zjištění změn obsahu složek dřeva vlivem termické úpravy.

Získané naměřené výsledky byly následně statisticky vyhodnoceny, za účelem potvrzení či vyvrácení výsledku měření. Použité a sledované faktory jako termická úprava, použití retardéru hoření a interakce termické úpravy s retardérem, které mají vliv na jednotlivé charakteristiky hoření jsme zkoumali pomocí Fišerova F-testu na hladině významnosti $P = 0,05$. Také jsme prováděli porovnávání jednotlivých druhů vzorků s odlišnými stupni termické úpravy. Pro možné závislosti mezi charakteristikami hoření a chemickým složením dřeva jsme na konec celkového statistického zhodnocení provedli porovnání pomocí korelačního koeficientu. Pro získání objektivního zhodnocení získaných statistických dat, provedu u některých charakteristik srovnání již se zveřejněnými výsledky, které byly získané na odlišné dřevině při stejném či podobném výzkumu.

U zkoumání úbytku hmotnosti za čas 1800 s jsme zjistili, že vliv je u sledovaných faktorů termické modifikace a retardéru hoření statisticky významný, zatím co u jejich interakce se statistická významnost neprokázala. To jsme zhodnotili podle dané hladiny významnosti $P = 0,05$. Vliv retardérů byl významný pro snížení úbytku hmotnosti, avšak

použitý přírodní retardér dosáhl horšího výsledku v úbytku hmotnosti než syntetický retardér. K nejmenšímu úbytku hmotnosti u všech sledovaných vzorků došlo při tepelné modifikaci 160 °C, zatímco k největšímu úbytku došlo bez termické modifikace, tedy při teplotě 20 °C. U obou retardérů hoření došlo ke statistické významnosti u teplot termické modifikace mezi 180 °C a 210 °C. Stejně tak tomu bylo i v případě bez retardéru hoření.

S porovnáním (Gašparík, a další, 2017) výsledků úbytku hmotnosti u dubového vzorku tepelně upraveným se syntetickým nátěrem (Flamgard Transparent) se ukázal vliv na jejich vzájemném působení. Stejně vyhodnocení získal i výzkum s tropickou dřevinou Padouk (Jindřich, 2018).

Další zkoumanou charakteristikou byla rychlost úbytku hmotnosti, kde se prokázalo, že u všech jednotlivých faktorů se $P = 0$, zatímco u jejich interakce se statistický vliv neprokázal. Statisticky významné hodnoty se projeví u teplot termické modifikace 180 °C a 210 °C u použitých retardérů a bez jeho použití. Nejrychlejší úbytek hmotnosti nastal při teplotě termické modifikace 160 °C u všech typů použitého retardéru.

Další zkoumanou charakteristikou byla maximální rychlost hoření. V závislosti na daných hodnotách hladiny významnosti „P“ se jedná o statisticky významné hodnoty u teploty termické modifikace a u retardéru hoření jde o statisticky velmi významnou hodnotu, avšak u jejich interakce se statistické významnosti nedosáhlo. U obou retardérů a bez jeho použití došlo ke statistické významnosti při teplotě termické modifikace 180 °C a 210 °C. U syntetického retardéru se projeví lepší hodnoty než u retardéru přírodního. Ve srovnání s jinými výsledky (Gašparík, a další, 2017) se u dubového dřeva při použití syntetického retardéru Flamgard projevil jen účinek tepelné modifikace a retardéru, ale ne u jejich interakce. V dalším výzkumu na termicky upravené dřevině teak se prokázala vyšší rychlost hoření při všech teplotách, než u dřeva neošetřeného (Čekovská, 2017).

Čtvrtou charakteristikou byl zkoumán čas při maximální rychlosti hoření. Podle hladiny významnosti $P = 0,05$ se potvrdil účinek teploty jako statisticky významný a u retardéru hoření jako statisticky velmi významný účinek. Zatímco u jejich interakce se účinnost neprokázala. U teplot termické modifikace 180 °C a 210 °C se přírodní retardér projevil jako statisticky významný. U syntetického retardéru se statistická významnost projevila u teplot termické modifikace 160 °C 180 °C a 210 °C, stejně jako vzorky bez použití retardéru.

Poslední zkoumanou charakteristikou bylo celkové. Jako v předešlých případech se i zde, podle hladiny významnosti $P = 0,05$, potvrdil účinek u retardéru hoření a u tepoty statisticky velmi významný účinek. Lepší účinnost oproti přírodnímu retardéru dosáhl retardér syntetický.

Další zkoumanou charakteristikou byla chemická analýza při vlivu tepelné modifikace. U všech základních chemických složek dřeva došlo ke statistické významnosti. Tepelná úprava způsobila výraznější zvýšení obsahu extraktivních látek u teploty 210 °C, k mírnému zvýšení u ligninu a celulózy také při teplotě 210 °C, zatím co u holocelulózy a hemicelulózy došlo ke snížení.

Výsledkem tohoto zkoumání lze konstatovat, že použitý syntetický i přírodní retardér má významný vliv na zlepšení požárních odolností u dřeviny Javoru (*Acer*). Avšak u syntetického retardéru se tyto vlastnosti projeví výrazněji oproti přírodnímu retardéru. Vliv termické úpravy se u všech faktorů prokázal podle dané hladiny významnosti „P“ jako statisticky působící, tím dochází ke zlepšování či zhoršování požárních vlastností u dřeviny Javoru (*Acer*). U výsledků chemického složení dřeva se potvrdil vliv teploty na obsah chemické struktury dřeva, kdy došlo vlivem působení teploty k významnějšímu zvýšení extraktivních látek a ligninu u teploty termické modifikace 210 °C, mírnějšímu zvýšení celulózy při teplotě 210 °C, zatím co u zbývajících dvou složek holocelulózy a hemicelulózy došlo ke snížení jejich obsahu. U podobného výzkumu došlo u dřeviny Iroko k významnému zvýšení ligninu a celulózy u termické úpravy 210 °C a u obsahu extraktivních látek došlo k mírnému zvýšení u teploty 160 °C a 180 °C. Obsah holocelulózy a hemicelulózy dopadl stejně jako v této práci, tedy došlo k poklesu (Jindřich, 2020).

10 Závěr

Tato bakalářská práce měla za úkol ze-sumarizovat zásadní poznatky o zvolených faktorech a jejich vlivu na vybraných požárních charakteristikách a otestovat účinnost retardérů hoření. Zkoumán zde byl i vliv teploty termické modifikace na chemické složení dřeva. Zvolené charakteristiky se netestovali jen na rostlé dřevině, ale i na dřevině, která prošla termickou modifikací, a to za teplot 160 °C, 180 °C a 210 °C. Pro toto testování byla zvolena dřevina javor, ochranný syntetický retardér hoření Flamgard a přírodní retardér arabinogalaktan.

Dle normy, podle které se tato práce prováděla se už v předešlých studiích potvrdil snadný a relativně přesný proces měření, který lze snadno zhotovit a opakovat. Jde o dostupné a nenáročné testování těles s ohledem na potřebnou přesnost.

Výsledné hodnoty, které jsme získali při působení teploty termické modifikace na chemické složení dřeva nám potvrdily významný vliv na změnu chemického složení. Při postupném zvyšování teploty termické modifikace došlo k výraznějšímu zvyšování obsahu extraktivních látek při teplotě 210 °C, k mírnému zvýšení ligninu a celulózy, také při teplotě 210 °C, zatím co u holocelulózy a hemicelulózy došlo k značnému snížení. Dále jsme získali hodnoty vzaté ze závislosti všech vybraných charakteristik hoření, tedy z maximální rychlosti hoření, času při maximální rychlosti, celkového tepla, úbytku hmotnosti a rychlosti úbytku hmotnosti v závislosti na všech základních chemických složek dřeva, kde se prokázala nízká závislost pomocí korelačního koeficientu.

Další hodnoty jsme získali z vybraných charakteristik hoření (maximální rychlosti hoření, čas při maximální rychlosti, celkové teplo, úbytek hmotnosti a rychlosti úbytku hmotnosti), které nám popisují jejich reakci na oheň a vzplanutí v případě dřeva, a jejich působení při aplikaci přírodního (arabinogalaktan) a syntetického (Flamgard) retardéru hoření. Toto testování se provádělo na kónickém kalorimetru po dobu 1800 s, u kterého jsme získali hodnoty jednotlivých faktorů, tedy teploty termické modifikace při teplotě 20 °C, 160 °C, 180 °C a 210 °C a retardéru hoření, společně s jejich interakcí. Testované vzorky jsme rozdělili do tří skupin, a to podle nánosu retardéru (přírodní, syntetický) či bez nánosu retardéru a s termickou modifikací či bez modifikace. Z tohoto testování jsme získali potřebné hodnoty pro stanovení jejich významnosti, dle hodnot hladiny významnosti „P“ a další fyzikální hodnoty, které jsme získali z měření a vážení před a po termické modifikaci vzorků.

Výsledkem této práce se prokázal významnější vliv syntetického retardéru hoření vůči vybraným charakteristikám hoření, oproti přírodnímu retardéru, u kterého nedošlo k výraznějším účinkům. U všech vybraných charakteristik došlo k významnému působení u jednotlivých faktorů, tedy retardéru a teploty termické modifikace. Avšak u jejich vzájemného působení se účinek neprokázal. Závěrem můžeme konstatovat, že samostatné faktory, tedy retardér hoření a teplota termické modifikace měla statisticky významný účinek.

Citovaná literatura

Výzkumný a vývojový ústav dřevařský. 2005. *drevari.humlak.cz*. [sborník] Praha, Březnice : Výrobní zkušební laboratoř Březnice, 2005.

Ahmed, A. S, a další. 2017. *Effect of oil impregnation on water repellency, dimensional stability and mold susceptibility of thermally modified European aspen and downy birch wood*. [článek] místo neznámé : Journal of Wood Science volume 63, 2017. DOI 10.1007/s10086-016-1595-y.

Aydin, I a Colakoglu, G. 2005. *Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood*. [článek] 61080 Trabzon, Turkey : Karadeniz Technical University, Faculty of Forestry, Forest Industry Engineering Department, 2005. Applied Surface Science.

Aytin, A, a další. 2015. *The effects of heat treatment with the ThermoWood® method on the equilibrium moisture content and dimensional stability of wild cherry wood*. [článek] místo neznámé : BioRes. 10(2), 2083-2093., BioRes. 10 (2), 2083-2093., 2015.

Bal, C, B. 2015. *Physical properties of beech wood thermally modified in hot oil and in hot air at various temperatures*. [článek] Kahramanmaras : Kahramanmaras Sütçü Imam Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği, 2015. ISSN 0718-221X.

Barčík, Š a Homola, T. 2004. *Vplyv vybraných parametrov na kvalitu obrobeného povrchu při rovinom frézování juvenilního borovicového dřeva. In: Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva*. Zvolen : Technická univerzita ve Zvolene, 2004. 978-80-228-2658-7.

Barčík, Š, a další. 2014. *Vliv technologických faktorů na kvalitu opracování povrchu při frézování termicky modifikovaného dřeva*. [článek] Zvolen : Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva, 2014. ISBN 978-80-228-2658-7.

Basu, P. 2018. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition)*. Canada : Department of Mechanical Engineering,, 2018. 978-0-12-812992-0.

Bekhta, P a Niemz, P. 2003. *Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood*. [článek] Ukrajina, Curych : Holzforschung 57 (5): 539-546, Holzforschung 57 (5): 539-546, 1 2003. DOI: 10.1515/HF.2003.080.

Blokland, v. J, Adamopoulos, S a Ahmed, S. A. 2020. *Performance of Thermally Modified Spruce Timber in Outdoor Above-Ground Conditions: Checking, Dynamic Stiffness and Static Bending Properties*. [článek] Växjö, Sweden : Department of

Forestry and Wood Technology, Linnaeus University,, 2020.
<https://doi.org/10.3390/app10113975>.

Boonstra, M, a další. 1998. *Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement.* [článek] místo neznámé : Holz als Roh- und Werkstoff volume 56, 1998. <https://doi.org/10.1007/s001070050287>.

Boonstra, M. J, a další. 2006. *MICROSTRUCTURAL AND PHYSICAL ASPECTS OF HEAT TREATED WOOD. PART 1. SOFTWOODS.* [článek] místo neznámé : Maderas. Ciencia y tecnología, 2006. ISSN 0718-221X.

Cai, Ch. 2020. *Effects of long-term moisture and weather exposure on the structure and properties of thermally modified wood.* [Dissertationes Forestales 298] Joensuu : School of Forest Sciences, Faculty of Science and Forestry, University of Eastern Finland, 2020. <https://doi.org/10.14214 / df.298>.

Čekovská, H, a další. 2017. *Fire resistance of thermally modified spruce wood.* [článek] místo neznámé : Bioresources 12 (4): 8451-8467, 2017. DOI: 10,15376 / biores.12.4.8451-8467.

Čekovská, H., Gaff, M., Osvaldová, L. M., Kačík, F., Kaplan, L., and Kubš, J. 2017. *"Tectona grandis Linn. and its fire characteristics affected by its thermal modification of wood,".* [článek] místo neznámé : bioresources.com, 2017. 2805-2817..

ČSN 73 0862/B-2. 1991. *Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot.* [norma] 1991. **D1107-96, ASTM.**

Dejmal, A. 2017. *Sušení a modifikace dřeva.* Brno : fraxinus.mendelu.cz, 2017.

Domingos, I, a další. 2020. *Calorific Power Improvement of Wood by Heat Treatment and Its Relation to Chemical Composition.* [článek] Portugal : Energie 2020 , 2020. 13 (20), 5322; <https://doi.org/10.3390/en13205322>.

Dufková, M. 2011. TZBinfo. *Požadavky na požární bezpečnost dřevostaveb.* [Online] ČVUT Praha, fakulta stavební, katedra ocelových a dřevěných konstrukcí, 28. únor 2011. [Citace: 3. březen 2021.] Dostupné z: http://stavba.tzbinfo.cz/drevostavby_nove/7184-pozadavky-na-pozarni-bezpecnost-drevostaveb.

Eramina, T. a Korolchenko, D. 2020. *Fire Protection of Building Constructions with the Use of Fire-Retardant Intumescent Compositions.* [článek] Moscow : Department of Integrated Safety in Construction, 2020. doi:10.3390/buildings10100185 .

Eremina, I a Korolchenko, D. 2020. *Fire protection of building structures using fireproof intumescent mixtures.* [článek] místo neznámé : Building, 10 (10), 2020. 185.

-
- Esteves, B, Domingos, I, J a Pereira, H, M. 2008.** *Pine wood modification by heat treatment in air.* [článek] místo neznámé : BioResources, 2008, 2008.
- Esteves, B,M a Pereira, H,M. 2009.** *Wood modification by heat treatment: A review.* místo neznámé : BioResources 4(1), 370-404., 2009.
- Gaff, M, Kačík, M a Gašparík, M. 2019.** *Impact of thermal modification on the chemical changes and impact bending strength of European oak and Norway spruce wood", Composite Structures .* [článek] místo neznámé : Composite Structures , 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.091>.
- Gaff, M. 2009.** *Vlastnosti povrchu dřeva modifikovaného reliéfováním.* Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2009. ISBN: ISBN 978-80-228-2035-6.
- Gaff, M., Kacik, F, a další. 2019.** *The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (Tectona grandis L. f.) wood.* [článek] místo neznámé : Construction and Building Materials 200:551-558, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.106.
- Gameche, S,L a Espinoza, O. 2017.** *Recommendation of a marketing strategy for the American heat-treated wood industry.* [článek] Minnesota : Saint Paul, 2017. 54.
- Gašparík, M, a další. 2019.** *Color and chemical changes in teak (Tectona grandis L. f.) and meranti (Shorea spp.) wood after thermal treatment.* Zvolen : Bioresources, 2019. DOI: 10.15376/biores.14.2.2667-26.
- Gašparík, M, Osvaldová, M, L a Čekovská, H. 2017.** *Flammability characteristics of thermally modified oak wood treated with a fire retardant.* [článek] místo neznámé : BioResources , 2017.
- Geffert, A, Geffertová, J a Dudiak, M. 2019.** *Direct Method of Measuring the pH Value of Wood .* [článek] místo neznámé : Forests 10(10), 2019. DOI: 10.3390/f10100852.
- Grexa, O a Lübke, H. 2001.** *Flammability parameters of wood tested on a cone calorimeter.* [článek] Bratislava : Státní výzkumný ústav lesních produktů, Dubravská cesta, 2001. DOI: 10.1016 / S0141-3910 (01) 00181-1.
- Gruda, N a Schnitzler, W, H. 2004.** *Suitability of wood fiber substrate for the production of plant transplants: I. Physical properties of wood fiber substrates.* [článek] místo neznámé : Scientia Horticulturae 100 (1-4), 2004. 309-322.
- Gunduz, G, Aydemir, D a Korkut, S. 2010.** *The Effect of Heat Treatment on Some Mechanical Properties and Color Changes of Uludag Fir Wood.* [článek] Turkey : Taylor & Francis Group,, 2010. 0737-3937.
-

Gündüz, G, Korkut, S a Korkut, D. S. 2008. *The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyani black pine (Pinus nigra Arn. subsp. pallasiana var. pallasiana) wood.* [článek] Duzce, Turkey : Bioresource Technology 99(7), 2008.

InnoFireWood. Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications. *Burning of wood.* [Online] virtual.vtt. [Citace: 18. únor 2021.] <http://virtual.vtt.fi/virtual/innofirewood/stateoftheart/database/burning/burning.html>.

Jindřich, J. 2018. *Protipožární odolnost rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného syntetickým antipyrénem.* [Bakalářská práce] Praha : autor neznámý, 2018.

Jindřich, J. 2020. *Protipožární odolnost rostlého dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného syntetickým antipyrénem.* [Diplomová práce] Praha : Česká zemědělská univerzita, 2020.

Jirouš-Rajković, V a Miklečić, J. 2017-2018. *Weathering Resistance of Modified Wood -A Reviewn.* [článek] Zagreb : University of Zagreb, Faculty of Forestry, 2017-2018. 946536 .

Jones, D., Brischke, Ch. 2017. *Performance of Bio-based Building Materials.* místo neznámé : Woodhead Publishing, 2017. 978-0-08-100982-6.

Kačíková, D, a další. 2020. *The Impact of Thermal Treatment on Structural Changes of Teak and Iroko Wood Lignins.* [článek] Zvolen : Faculty of Wood Sciences and Technology, Technical University in Zvolen., 2020. Appl. Sci. 2020 , 10 (14), 5021.

Karmarkar, A, a další. 2007. *Mechanické vlastnosti polypropylenových kompozitů vyztužených dřevovláknny: Účinek kompatibilizátoru s isokyanátovou funkční skupinou. Kompozity, část A: Aplikovaná věda a výroba.* místo neznámé : 38 (2), 2007. 227-233.

Kirk, T a Cowling, E, B. 1984. *Biological decomposition of solid wood .* místo neznámé : Ady Chem, 207, 1984.

Kocaefe, D, a další. 2010. *MODELLING OF HIGH TEMPERATURE HEAT TREATMENT OF WOOD.* [článek] Canada : Department of Applied Sciences, 2010. G7H 2B1 Canada .

Kol, H. S., Sefil, Y. 2011. *The thermal conductivity of fir and beech wood heat treated at 170, 180, 190, 200, and 212°C.* [článek] místo neznámé : Journal of Applied Polymer Science, 2011. <https://doi.org/10.1002/app.33885>.

-
- Korkut, D, S, Hiziroglu, S a Aytin, A. 2013.** *Effect of heat treatment on surface characteristics of wild cherry wood.* [článek] místo neznámé : BioRes. 8(2), , 2013. DOI: 10.15376/biores.8.2.1582-1590.
- Kubovský, I, Kačíková, D a Kačík, F. 2020.** *Structural Changes of Oak Wood Main Components Caused by Thermal Modification.* [článek] Zvolen : Faculty of Wood Sciences and Technology, Technical University in Zvolen, 2020.
- Macháček, J. 2018.** *11. Dřevo, materiálové vlastnosti.* [prezentace] místo neznámé : people.fsv.cvut.cz, 2018.
- Matovič, A. 1993.** *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi.* Brno : 1. vyd. Brno: Vysoká škola zemědělská v Brně,, 1993. 80-7157-086-9.
- Najmanová, H. 2013.** *Intumescentní požární nátěry – životnost, obnova, laboratorní.* [seminární práce] Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2013.
- Narodoslawsky, M, Niederl-Schmidinger, A a Halasz, L. 2008.** *Utilising renewable resources economically: new challenges and chances for process development.* [článek] Veszprem : Journal of Cleaner Production, 2008.
- Nhacila, F, a další. 2020.** *Effects of thermal modification on physical and mechanical properties of Mozambican Brachystegia spiciformis and Julbernardia globiflora wood.* [článek] místo neznámé : European Journal of Wood and Wood Products , European Journal of Wood and Wood Products , 2020. <https://doi.org/10.1007/s00107-020-01576-z>.
- Percin, O, Peker, H a Atilgan, A. 2016.** *THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE SOME PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BEECH (FAGUS ORIENTALIS LIPSKY) WOOD.* [článek] Turkey : WOOD RESEARCH, 2016. 61 (3): 2016.
- Persson, K. 2020.** *Micromechanical modeling of wood and fiber properties.* [článek] místo neznámé : Lund University, Department of Mechanics and Materials , 2020.
- Rapp, A. O a Sailer, M., 2001.** *Heat treatment of wood in Germanystate of the art.* Hamburg : Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg, Germany, 2001. 3 - 926 301 - 02 - 3.
- Rapp, O, A. 2001.** *Review on heat treatments of wood.* Hamburg : BFH The Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, 2001. 3 – 926 301 – 02 – 3 .
- Reinprecht, L a Vidholdová, Z. 2011.** *Termodrevo.* místo neznámé : Šmíra-Print, 2011.
- Reinprecht, L a Vidholdova, Z. 2008.** *Termodrevo - príprava, vlastnosti a aplikácie.* Zvolen : TU Zvolen, 2008. ISBN: 978-80-228-1920-6.
-

-
- Reinprecht, L. 2008.** *Ochrana dřeva*. Zvolen : Zvolen : Technická univerzita, 2008. 978-80-228-1863-6.
- Sandberg, D a Kutnar, A. 2016.** *Tepelně upravené dřevo: nejnovější vývoj v Evropě a Severní Americe*. [článek] místo neznámé : Věda o dřevě a vláknech, 48 (1), 2016. 28-39.
- Srinivas, K a Pandey, K.K. 2012.** *Effect of Heat Treatment on Color Changes, Dimensional Stability, and Mechanical Properties of Wood*. [článek] místo neznámé : Journal of Wood Chemistry and Technology, 2012. DOI: 10.1080 / 02773813.2012.674170.
- Stamm, A, J. 1964.** *Wood and cellulose science*. USA : Ronald Press, Chapter 19, 1964. DOI: 10.1021 / ba-1984-0207.ch005.
- Stamm, J, A a Hansen, L, A. 1937.** *Minimizing wood shrinkage and swelling effect of heating in various gases*. Madison : Industrial & Engineering Chemistry, 1937.
- swm - wood.** swm - wood. swm - wood. [Online] [Citace: 8. únor 2021.] <http://www.swm-wood.com/en/thermally-modifiedwood/characteristics/colour/.pdf>;
- ThermoWood®Handbook. 2003.** *ThermoWood®Handbook*. [Handbook] Helsinki, Finland : International ThermoWood Association, 2003. FIN-00130 Helsink.
- Tyree, M, T a Ewers, F, W. 1991.** *Hydraulic architecture of trees and other woody plants*. [článek] místo neznámé : New fytolog, 119 (3), 1991. 345-360.
- Wegst, U,G,K a Ashby, M, F. 2004.** *Mechanická účinnost přírodních materiálů*. [časopis] místo neznámé : Philosophical Magazine, 84 (21), 2004. 2167-2186.
- Wilkie, C, A a Morgan, A, B. 2009.** *Zpomalení hoření polymerních materiálů*. [článek] místo neznámé : CRC tick, 2009.
- Williamson, G, B a Wiemann, M, C. 2010.** *Measuring the specific weight of wood ... correctly*. [článek] místo neznámé : American Journal of Botany, 97 (3), 2010. 519-524.
- Wise, L, E, Murphy, M a D'addeico, A, A. 1946.** *Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses*. [článek] místo neznámé : Paper Trade Journal, 1946. 122 s. 35-43..
- Yan-jun, X, Yi-xing, L a Yao-xing, S. 2011.** *Heat-treated wood and its development in Europe*. [článek] místo neznámé : Journal of Forestry Research, 13 (3): , Journal of Forestry Research, 13 (3), 2011. Article ID: 1007-662X(2002)03-0224-07.
- Yan-jun, X, Yi-xing, L a Yao-xing, S. 2002.** *Heat-treated wood and its development in Europe*. [článek] Harbin : Journal of Forestry Research, 2002. ID: 1007-662X(2002)03-0224-07.
-

Yildiz, C, U, Yildiz, S a Gezer, D, E. 2005. *MECHANICAL AND CHEMICAL BEHAVIOR OF BEECH WOOD*. Trabzon, Turkey : Society of Wood Science and Technology, 2005.

Zobel, B, J a Sprague, J, R. 1998. *Predictions of Mature and Total Tree Wood Properties from Juvenile Wood*. Berlín : Springer, Berlín, Heidelberg, 1998. 978-3-642-72126-7.

Normy

ISO 13061-1 . 2014. Stanovení obsahu vlhkosti dřevem pro fyzikální a mechanické zkoušky. [Norma]. Ženeva, Švýcarsko : Mezinárodní organizace pro normalizaci, 2014.

ISO 13061-2 . 2014. *Stanovení hustoty dřeva pro fyzikální a mechanické zkoušky*. Ženeva, Švýcarsko : Mezinárodní organizace pro normalizaci, 2014.

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

ISO 5660-1: 2002. *Reaction-to-fire test – Heat release, smoke production and mass loss rate. Heat release rate (cone calorimeter method)*. [dokument] Switzerland : Case postale 56, 2002.