



Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Posouzení vlivu stárnutí na tepelné charakteristiky termicky upraveného
dřeva jedle obrovské**

Bakalářská práce

Autor: Adam Ferčák

Vedoucí práce: doc. Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: Adam Ferčák
Studijní program: Dřevařství
Specializace: Zpracování dřeva
Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.
Garantující pracoviště: Katedra zpracování dřeva a biomateriálů
Jazyk práce: Čeština

Název práce: **Posouzení vlivu stárnutí na tepelné charakteristiky termicky upraveného dřeva jedle obrovské**

Název anglicky: **Assessment of the effect of aging on the thermal characteristics of heat-treated Grand fir wood**

Cíle práce: Cílem práce je posoudit vliv stárnutí na součinitele tepelné a teplotní vodivosti termicky upraveného dřeva (180 °C a 200 °C) jedle obrovské (*Abies grandis* Lindl.) z lokalit České republiky, i z pohledu jeho užitkových vlastností.

Metodika:

- 1) Zpracovat literární rešerši o dané dřevině, tepelné úpravě, stárnutí dřeva a posuzovaných vlastnostech.
- 2) Odebrat reprezentativní vzorníky z vybraných lokalit a připravit zkušební tělesa. Na těchto tělesech následně provést termickou úpravu procesem ThermoWood® při dvou výše uvedených teplotních stupních.
- 3) Přístrojem ISOMET 2114 (s použitím plošné sondy) změřit tepelné charakteristiky na termicky upravených zkušebních tělesech a poté provést jejich stárnutí, a to buď přirozeným nebo umělým způsobem, podle aktuálních časových možností. Následně opět realizovat měření tepelných charakteristik. Experimenty v každém případě zahrnují stanovení hustoty a vlhkosti před a po stárnutí, a doporučuje se i zařazení měření barvy a lesku. Vzorky před jakýmkoliv měřením budou na-klimatizovány v prostředí klimatizační komory s relativní vlhkostí vzduchu 65 % a teplotou 20 °C.
- 4) Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.
- 5) Pokusit se analyzovat rozdíly v tepelných charakteristikách termo-dřeva před a po stárnutí, jejich možné příčiny pro danou dřevinu, a to i z pohledu užitkových vlastností.

Harmonogram práce:

leden 2021 až duben 2021 – oficiální zadání práce do aplikace UIS

květen 2021 až prosinec 2021 – práce na literární rešerši

červenec 2021 až únor 2022 – příprava materiálu a experimentální část (měření)

a získávání dat)
listopad 2021 až březen 2022 – statistické vyhodnocení dat
únor 2022 až březen 2022 – stanovení závěrů a zhodnocení
březen 2022 až duben 2022 – finalizace práce a odevzdání práce do aplikace UIS

Doporučený rozsah práce: 40 - 50 stran (bez příloh)

Klíčová slova: dřevo, jedle obrovská, tepelná úprava, stárnutí, tepelná vodivost, teplotní vodivost, objemová tepelná kapacita

Doporučené zdroje informací:

1. BORŮVKA, V., BABIAK, M. (2016). Vlastnosti dřeva v příkladech, 1. vyd. Praha ČZU. 139 s.
2. BUCUR, V. (2003). Nondestructive Characterization and Imaging of Wood, Springer-Verlag, Germany. 354 s.
3. ČSN EN 12664. (2001). Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Suché a vlhké výrobky o středním a nízkém tepelném odporu.
4. ČSN EN 12667. (2001). Tepelné chování stavebních materiálů a výrobků - Stanovení tepelného odporu metodami chráněné topné desky a měřidla tepelného toku - Výrobky o vysokém a středním tepelném odporu.
5. HILL, C.A.S. (2006). Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes, John Wiley & Sons: London, UK. 260 s.
6. ITA (International Thermowood Association). (2003). Thermowood Handbook; International Thermowood Association: Helsinki, Finland; Dostupné online: https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf (přístupné k 1.2.2021).
7. POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda. 485 s.
8. REINPRECHT, L. (2016). Wood Deterioration, Protection and Maintenance, John Wiley & Sons, Oxford, United Kingdom. 376 s.
9. ROHSENOW, W.M., HARTNETT, J.P., CHO, Y.I. (Ed.). (1998). Handbook of Heat Transfer, 3. vydání, McGraw-Hill Education: New York. 1520 s.
10. TSOUMIS, G. (1991). Science and technology of wood – structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall. 497 s.

Předběžný termín obhajoby: 2021/22 LS – FLD

Konzultant: doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Elektronicky schváleno: 1. 5. 2021

Ing. Radek Rinn
Vedoucí ústavu

Čestné prehlásenie

Týmto prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Posouzení vlivu stárnutí na tepelné charakteristiky termicky upraveného dřeva jedle obrovské“ vypracoval samostatne pod vedením doc. Ing. Vlastimil Borůvky, PhD a použil len podklady, ktoré uvádzam v zozname použitej literatúry.

Som si vedomý, že zverejnením bakalárskej práce súhlasím s jej zverejnením podľa zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platnom znení a to bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Prahe, dňa 10.04.2022

.....

Adam Ferčák

Pod'akovanie

Týmto by som sa rád poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce, doc. Ing. Vlastimilovi Borůvkovi, PhD za odbornú pomoc, pripomienky a konzultácie. Ďalej by som sa chcel poďakovať Ing. Tomášovi Holečkovi za oboznámenie s meracími prístrojmi, Ing, Davidovi Novákovi za pomoc pri manipulácii so vzorkami a taktiež, doc. Ing. Milošovi Pánkovi, Ph.D. za pomoc s UV komorou a FLD ČZU za sprístupnenie laboratória potrebného na merania pri tejto práci.

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa venuje teplotným vlastnostiam termicky upraveného dreva (thermowood) jedle obrovskej (*Abies grandis*) z lokalít Českej republiky.

Teoretická časť práce nás oboznamuje s pôvodom a históriou skúmanej dreveniny, jej vývojom ako aj jej infiltráciou do Českej republiky. Taktiež nám analyzuje metódu termickej úpravy dreva thermowood, prevedie nás základnými vlastnosťami dreveniny a bližšie nás informuje o teplotných vlastnostiach, konkrétne nami skúmanými súčiniteľmi teplotnej a tepelnej vodivosti a objemovej tepelnej kapacity.

V praktickej časti sa zameriavame na posúdenie vplyvu starnutia termicky upraveného dreva na základné tepelné vlastnosti dreva jedle obrovskej. Sústreďíme sa najmä na koeficienty tepelnej a teplotnej vodivosti a objemovú tepelnú vodivosť, ktoré považujeme za najpodstatnejšie tepelné charakteristiky dreva. Súbežne s meraním teplotných charakteristík sme sa zamerali aj na niektoré z iných vlastností dreva a to konkrétne jeho hustotu, farbu a lesk. Cieľ našej práce spočíva v nameraní a porovnaní spomínaných vlastností termicky upraveného dreva jedle obrovskej pred starnutím s jej vlastnosťami po zostarnutí. Pre praktické účely je veľmi dôležité a zaujímavé taktiež porovnanie týchto vlastností thermowoodu a termicky neupraveného dreva.

Kľúčové slová

drevo, jedľa obrovská, tepelná úprava, starnutie, tepelná vodivosť, teplotná vodivosť, objemová tepelná kapacita

Abstract

This bachelor thesis deals with the thermal properties of thermally treated wood (thermowood) of Grand fir (*Abies grandis* Lindl.) from localities of the Czech Republic.

The theoretical part of the thesis introduces us to the origin and history of the studied wood species, its development as well as its infiltration into the Czech Republic. It also analyses the Thermowood method of thermal treatment of wood, guides us through the basic properties of the wood species and informs us in more detail about the thermal properties, namely the thermal conductivity, diffusivity and volumetric heat capacity.

In the practical part, we focus on assessing the effect of aging of thermally treated wood on the basic thermal properties of grand fir wood. In particular, we focus on the thermal conductivity, diffusivity and volumetric heat capacity, which we consider to be the most important thermal characteristics of wood. In parallel with the measurement of thermal characteristics, we also focused on some of the other properties of the wood, namely its density, colour and gloss. The aim of our work is to measure and compare the aforementioned properties of thermally treated grand fir wood before aging with its properties after aging. For practical purposes it is also very important and interesting to compare these properties of thermowood and untreated wood.

Key words

wood, grand fir, heat treatment, aging, thermal conductivity, thermal diffusivity, volumetric heat capacity

Obsah

| | |
|--|-----|
| 1. Úvod..... | 11 |
| 2. Ciele práce | 12 |
| 3. Teoretický rozbor literatúry | 13 |
| 3.1. Jedľa obrovská..... | 13 |
| 3.2. Tepelná úprava dreva..... | 15 |
| 3.3. Starnutie dreva | 18 |
| 3.3.1. Vplyv teploty | 18 |
| 3.3.2. Vplyv vody a vlhkosti | 18 |
| 3.3.3. Vplyv slnečného žiarenia | 19 |
| 3.3.4. Vplyv nečistôt a vetra..... | 19 |
| 3.4. Skúmané fyzikálne vlastnosti | 20 |
| 3.4.1. Hustota a vlhkosť | 20 |
| 3.4.2. Tepelné charakteristiky | 22 |
| 3.4.3. Optické vlastnosti..... | 24 |
| 4. Metodika | 26 |
| 4.1. Príprava vzoriek..... | 26 |
| 4.2. Tepelná úprava vzoriek | 26 |
| 4.3. Meranie vzoriek pred starnutím..... | 27 |
| 4.4. Starnutie..... | 28 |
| 4.5. Meranie vzoriek po starnutí..... | 29 |
| 4.6. Vyhodnotenie dát..... | 30 |
| 5. Výsledky a diskusia | 30 |
| 6. Záver | 43 |
| 7. Zoznam použitej literatúry | 435 |

Zoznam tabuliek

| | |
|--|----|
| Tabuľka č. 1. Výsledky hustoty ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)..... | 31 |
| Tabuľka č. 2. Výsledky tepelnej konduktivity λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)..... | 32 |
| Tabuľka č. 3. Výsledky objemovej tepelnej kapacity $c\cdot\rho \cdot 10^6$ ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)..... | 34 |
| Tabuľka č. 4. Výsledky tepelnej difuzivity $\alpha \cdot 10^{-6}$ ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)..... | 36 |
| Tabuľka č. 5. Výsledky svetlosti..... | 37 |
| Tabuľka č. 6. Výsledky farebných parametrov a, b..... | 39 |
| Tabuľka č. 7. Výsledky celkovej farebnej zmeny ΔE | 40 |
| Tabuľka č. 8. Výsledky lesku pred meraním (Gu)..... | 41 |
| Tabuľka č. 9. Zmeny vlastností po starnutí (%)..... | 43 |

Zoznam obrázkov

| | |
|--|----|
| Obrázok č. 1. Prirodzený výskyt jedle obrovskej na území USA a Kanady (Tomec, 2017)..... | 13 |
| Obrázok č.2. Vzrastajúci objem celosvetovej produkcie ThermoWoodu (ThermoWood Association, 2019)..... | 16 |
| Obrázok č.3. Fázy výroby ThermoWoodu (Thermowood Handbook, 2003)..... | 17 |
| Obrázok č. 4. Meranie farby spektrofotometrom VTL CM-600D určujúcim farbu pomocou L^*a^*b diagramu (vlastné)..... | 25 |
| Obrázok č. 5. ISOMET 2114 použitý na meranie tepelných charakteristík (vlastné)..... | 28 |
| Obrázok č. 6. Porovnanie vizuálu rôzne upravených vzoriek. Zľava (bez tepelnej úpravy pred starnutím, bez tepelnej úpravy po starnutí, tepelná úprava pri 180 °C po starnutí, tepelná úprava pri 200 °C po starnutí (vlastné)..... | 29 |

Zoznam grafov

| | |
|---|----|
| Graf č. 1. Grafické zobrazenie zmeny hustoty pred a po starnutí..... | 31 |
| Graf č. 2. Grafické zobrazenie zmeny súčiniteľa tepelnej vodivosti pred a po starnutí..... | 33 |
| Graf č. 3. Grafické zobrazenie zmeny objemovej tepelnej kapacity pred a po starnutí..... | 35 |
| Graf č. 4. Grafické zobrazenie zmeny súčiniteľa teplotnej vodivosti pred a po starnutí..... | 36 |
| Graf č. 5. Grafické zobrazenie zmeny svetlosti pred a po starnutí..... | 38 |
| Graf č. 6. Grafické zobrazenie zmeny farebného parametru a..... | 39 |
| Graf č. 7. Grafické zobrazenie zmeny farebného parametru b..... | 39 |
| Graf č. 8. Grafické zobrazenie zmeny farby pred a po starnutí..... | 40 |
| Graf č. 9. Grafické zobrazenie lesku rôznych tepelných úprav pred starnutím..... | 42 |

1. Úvod

Drevo patrí medzi najdôležitejšie materiály pri vývoji ľudstva a jeho využitie sa zachovalo až do dnes, dokonca sa jeho využiteľnosť časom zvyšuje. Nakoľko drevo zaradujeme medzi prírodné materiály, jedna z jeho mnohých výhod je jeho obnoviteľnosť. Vzťah medzi drevom a človek prešiel dlhou evolúciou, kedy už v praveku slúžilo pravekým ľuďom ako najzákladnejší opracovateľný materiál, ktorý bol dôležitý pre ich prežitie, nakoľko tvoril základné prvky historických zbraní či náradia na obrábanie pôdy. (Radkau, 2007). Drevo bolo už odpradáva používane taktiež ako palivo, kedy sa pomocou neho ľudia udržiavali v teple aj počas chladných období. Drevo ako materiál prešlo dlhou evolúciou počas ktorej ho ľudia používali čím ďalej, tým častejšie. Postupom času sa drevo začalo využívať na výrobu prvých nábytkov, starých kočov či drevených konštrukcií obydlí. Množstvo z týchto využití vidíme dodnes a dokonca sme drevo začali využívať omnoho viac. Hlavným dôvodom takto širokého spektra využitia drevnej hmoty je výborná kombinácia jeho fyzikálnych a mechanických, obrobiteľnosť a hlavne jeho prírodnosť a prirodzenosť.

Vlastností dreva závisia od množstva rôznych činiteľov, akými môžu byť napríklad nadmorská výška či pôda v ktorej strom rastie, ale najviac ovplyvňuje vlastností dreva typ dreviny, či už sa jedná o ihličnan alebo listnáč a taktiež jeho ďalšie zaradenie do čeľade a rodu, keďže každá jedna drevina, (dokonca každý jeden strom) je jedinečný a odlišný od ostatných. (Fabiyi, McDonald, 2010). Vlastností dreva sú taktiež závislé na veku dreviny. Tak ako pri živom strome môžeme porovnávať rozdielnu kvalitu vlastností u mladého a starého stromu, taktiež u spracovaného dreva môžeme sledovať patričné zmeny vo vlastnostiach čerstvo pripravenej vzorky dreva a tej istej vzorky za pôsobenia vonkajších vplyvov a predovšetkým času.

Znalosť zmeny vlastností dreva pri pôsobení rôznych činiteľov je veľmi dôležité pre špecifikáciu použitia danej dreviny za daných podmienok. Nakoľko má každá drevina svoje špecifické vlastnosti, pre použitie v praxi je dôležitou súčasťou taktiež znalosť rôznych metód úpravy dreva pre maximálne využitie kvalitných vlastností a taktiež pre minimalizáciu nežiaducich účinkov nevhodných vlastností danej dreviny.

2. Ciele práce

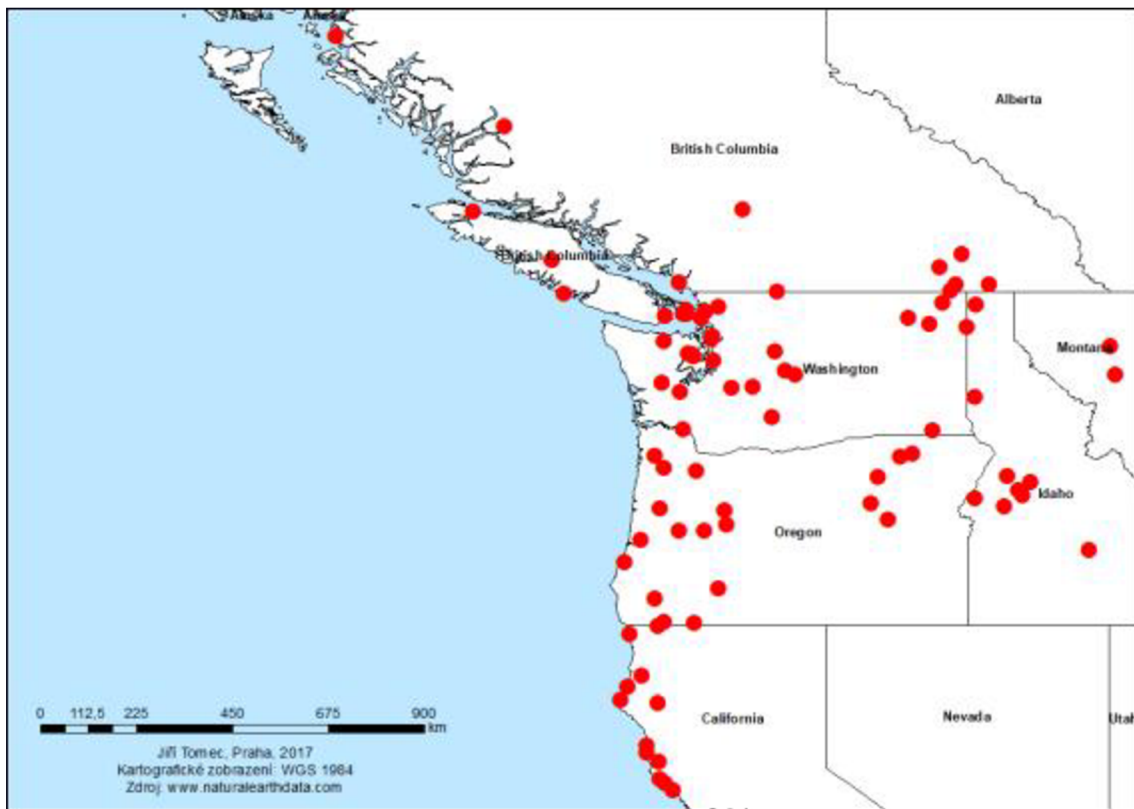
Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce je posúdiť vplyv starnutia tepelne upraveného dreva (thermowood) jedle obrovskej na jeho tepelné vlastnosti a to konkrétne súčinitele tepelnej a teplotnej vodivosti a jeho objemovú tepelnú kapacitu. Cieľom tejto práce je porovnať tieto vlastnosti dvoch rôznych modifikácií dreva jedle obrovskej z lokalít z Českej republiky, a to úpravy pri teplote 180 °C a 200 °C.

Čiastkovými cieľmi tejto práce sú určenie hustoty, farby a lesku tepelne upraveného dreva jedle obrovskej pred starnutím a po ňom, ich vzájomné porovnanie a taktiež ich porovnanie s referenčnými vzorkami tepelne neupraveného dreva.

3. Teoretický rozbor literatúry

3.1. Jedľa obrovská

Jedľa obrovská (*Abies Grandis*) alebo anglicky Grand Fir je strom rodu *Abies*, ktorý je však typický najmä pre severoamerický kontinent. Prvé zmienky o jedli obrovskej pochádzajú z roku 1805, avšak prvýkrát bola bližšie špecifikovaná a popísaná v roku 1833 Johnom Lindley-om. (Hunt, 2002) Táto drevina sa prirodzene vyvinula a rastie predovšetkým v severozápadných priestransvách USA a to konkrétne v častiach štátov Washington, Oregon, Idaho, Montana či po západnom pobreží Kalifornie. Prirodzený rast tejto dreviny zasahuje aj do južných častí Kanadskej provincie Britská Kolumbia (Hofman, 1963).



Obrázok č. 1. Prirodzený výskyt jedle obrovskej na území USA a Kanady (Tomec, 2017)

Introdukciu jedle obrovskej do Európy započala Veľká Británia v už v polovici 19. storočia a to najmä pre jej rýchly rast, ktorý bol veľmi zaujímavým pre jej ďalšie skúmanie a potenciálne využitie. Prvé zmienky o výsadbe jedle obrovskej na území Českej republiky sú podľa Musila a Hamerníka (2007) datované do druhej polovice 19. storočia, kedy bola

umiestňovaná najmä do parkov a voľnočasových priestorov. Zvýšený záujem o jej výsadbu v lesných porastoch Českej republiky nastal až v druhej polovici 20. storočia, kedy bola zameraná pozornosť na jej bližšie preskúmanie v oblasti rýchlosti rastu (Šika, 1983), keďže predstavovala vysoko potenciálnu náhradu jedle bielej, ktorej sa v tomto období vôbec nedarilo a začal jej postupný zánik z lesov. (Fulín, 2015).

Jedľa obrovská patrí medzi veľmi rýchlo rastúce stromy pričom sa vlastnosťami podobá na drevo douglasky, ktorá taktiež pochádza z USA (Zeidler a kol, 2010). Výhoda rýchleho rastu je však kompenzovaná kvalitou drevnej hmoty a to konkrétne nižšou hustotou a horšími mechanickými vlastnosťami (najmä v pevnosti) ako u našich domácich drevín. Ako uvádza Lukášek (2012), jedli obrovskej sa najlepšie darí v jej prirodzenom prostredí v USA, kde rastie najrýchlejším tempom pri dosiahnutí priemernej hustoty dreva iba 370 kg/m³, pričom v podmienkach strednej Európy je rast pomalší pri vyššej priemernej hustote dreva, konkrétne 405 kg/m³. Ako už bolo spomenuté, hustota jedle obrovskej je v porovnaní s hustotou domácich listnatých drevín, ktorým je najpodobnejšia. (Wagenführ a kol, 1974). Podľa Větvičky sa sa strom tohto druhu dožíva približne 250 rokov.

Kmeň jedle obrovskej býva predovšetkým kužeľovitého tvaru, pričom jeho najbežnejšie dosahovaná výška sa udáva v rozmedzí 43 - 61 m (Foiles a kol, 1990), ojedinelé sú kusy s výškou nad 100 m (Hofman, 1963). Priemerná výčetná hrúbka stromu sa uvádza v rozmedzí približne 71 - 102 cm (Foiles a kol, 1990), pričom niektorí autori uvádzajú aj mierne vyššie hodnoty. Farba dreva môže nadobúdať viacero tónov, pričom mladé stromy sú svetlohnedým až takmer bielym sfarbením. Vekom drevo jedle obrovskej začína nadobúdať väčšie množstvo hnedých či miestami až červenkastých odtieňov (Fulín, 2015). Pri vysušenom dreve je takmer nerozpozateľný rozdiel medzi jadrom a belou, na druhej strane je však ľahko viditeľný rozdiel medzi jarným a letným drevom. Za výhody tohto dreva môžeme považovať najmä ľahkú obrobiteľnosť a sušiteľnosť, ako aj jeho ľahkú impregnovateľnosť, ktorú oproti ostatným konkurenčným listnáčom nadobúda absenciou živcových kanálikov.

Drevo jedle obrovskej je svojimi vlastnosťami ako aj nadmernou rýchlosťou rastu oproti konkurenčným drevinám najvhodnejšie na chemické spracovanie a to najmä na výrobu buničiny a papieroviny. Práve rýchlosť rastu zabezpečuje dobrý prístup k veľkému množstvu dreva za relatívne krátky čas a taktiež charakteristicky dlhé vlákna dosahujúce priemernú dĺžku až 3,2 mm (Hofman, 1963), ktoré zabezpečujú vyššiu kvalitu papiera a jeho nižšiu

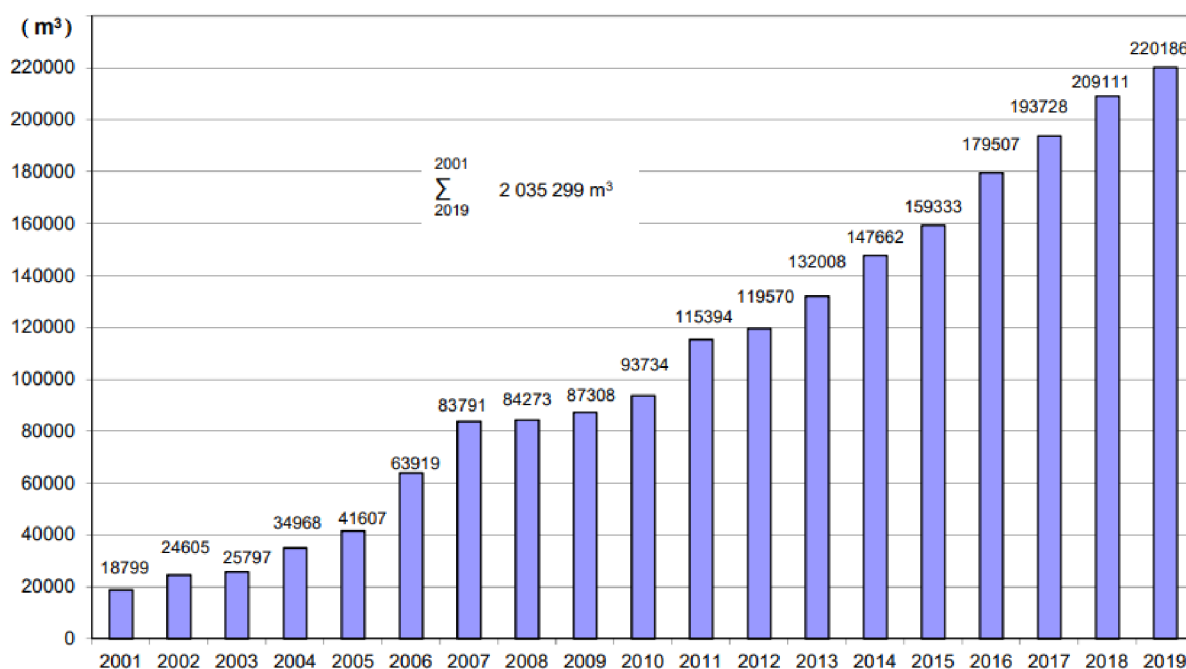
poddajnosť voči pretrhnutiu. Absencia živicových kanálikov uľahčuje bielenie buničiny a tým zvyšuje potenciál tejto dreviny práve v chemickom priemysle. Vo vnútrozemských štátoch Európy sa naopak jedľa obrovská využíva najmä na konštrukčné prvky ľahkých drevených stavieb ako senníky či stodoly, ktoré často nie sú zaťažované tak veľkými silami ako napríklad drevené domy. Využitie tohto dreva našlo obdobu taktiež vo výrobe transportných prepraviek, rôznych obalových materiálov, či stavebného debnenia. (Tomec, 2017; Fulín, 2015; Hofman, 1963)

3.2. Tepelná úprava dreva

Technológia termickej úpravy dreva thermowood patrí medzi modernejšie no v dnešnej dobe už najpoužívanejšie metódy modifikácie dreva teplom (Hill, 2006) ako nám ukazuje Obr. 2. vzrastajúci záujem o tepelne modifikované drevo. V Európe sa začala tepelná modifikácia dreva rozširovať od Škandinávskych krajín, kedy v roku 2001 Fínsko predstavovalo 40 % svetovej produkcie tepelne modifikovaného dreva. Postupom času thermowood naberal na popularitu a tým expandovala aj jeho výroba do celého sveta. Štatistika z roku 2019 hovorí že v danom roku Fínsko vyprodukovalo 5 % celkového objemu thermowoodu, zvyšné Európske krajiny 80 % a zvyšok sveta (Najmä USA a Ázia) vyprodukovali 15 % ročného objemu thermowoodu (ThermoWood Association, 2019).

Hlavnou výhodou termickej úpravy je zvýšenie odolnosti dreva voči biotickým a abiotickým činiteľom. Za asi najvýznamnejšiu zmenu je považovaná zvýšená rozmerová stálosť modifikovaného dreveného prvku pri zmene vlhkosti prostredia, čo predurčuje využitie thermowoodu predovšetkým v exteriéri (Reinprecht a kol, 2008). Jeho použitie v exteriéri podporuje taktiež zvýšená odolnosť voči drevokazným hubám či hmyzu. Za nevýhodu možno považovať mierne zníženie niektorých mechanických vlastností. Pri termickej úprave dreva je opticky najviac badateľná zmena farby, ktorá závisí predovšetkým od výšky teploty pod ktorou modifikácia prebieha. Podľa Hilla (2006) sa najčastejšie používajú teploty v rozmedzí 150 - 230 °C. Toto ohraničenie je špecifikované práve správaním drevnej hmoty pri rôznych teplotách. Pri teplotách nižších ako 140 °C nemá teplota výrazný vplyv na zmeny vlastností dreva. pri teplotách nad 140 °C začína dochádzať k reakciám najmä hemicelulóz za vzniku kyseliny octovej a metanolu čo má za následok postupnú zmenu vlastností. Pri teplotách nad 270 °C pôsobiach na drevo už dochádza k

výrazným zmenám reakčnej kinetiky ktoré môžu mať za následok nežiaduce vzplanutie dreva a následné horenie. Farba výsledného výrobku najviac závisí od teploty a expozičného času, pričom pri krátkej expozícii pri nízkych teplotách drevo farbu takmer nemení, no pri dlhších expozíciách pri vyššej teplote drevo tmavne pričom môže nadobúdať až veľmi tmavé odtiene hnedej farby.



Obrázok č.2. Vzrastajúci objem celosvetovej produkcie thermowoodu (ThermoWood Association, 2019)

Technológia tepelnej modifikácie dreva thermowood prebieha v troch fázach úpravy (Gandelová a kol, 2009).

1. fáza - zvýšenie teploty a sušenie

Prvá fáza procesu je časovo najnáročnejšia, pričom ako nám ukazuje obrázok 3, môže trvať približne 15 hodín. Počas fáze 1 nastáva v komore k prudkému nárastu teploty na 100 °C a následnému pozvoľnému zvyšovaniu teploty do hranice 130 - 150 °C za prístupu horúceho vzduchu či vodnej pary. Toto prostredie pri zvyšujúcej sa teplote zabezpečuje sušenie dreva až na hodnotu vlhkosti blížiacej sa k 0 %. Prostredie vodnej pary napomáha postupnému vysychaniu dreva a tým zamedzuje prípadnému vzniku trhlín v procese sušenia.

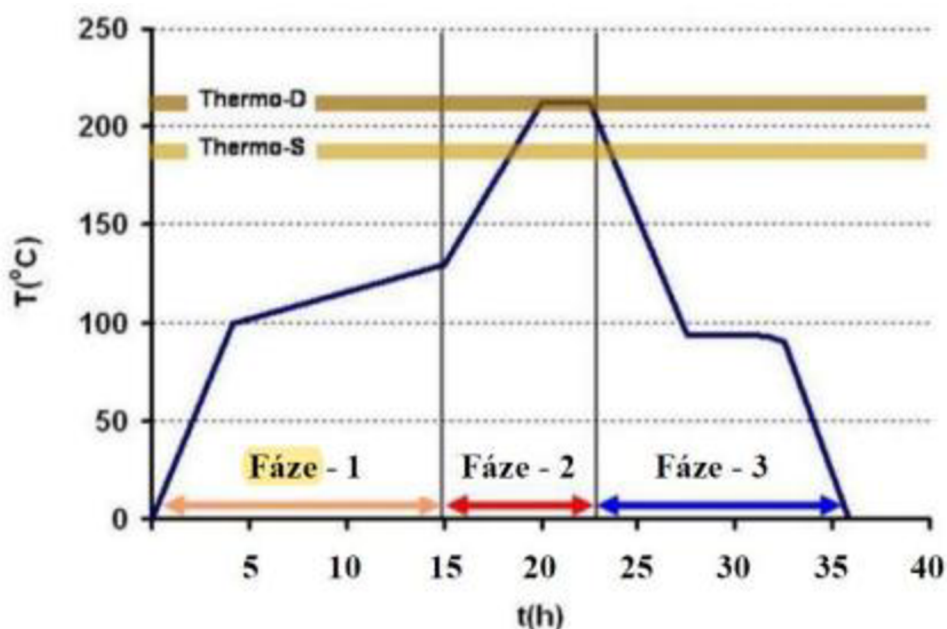
2. fáza - tepelná modifikácia

Druhá fáza tepelnej úpravy dreva je považovaná za tú najdôležitejšiu z pohľadu zmeny vlastností modifikovaného dreva. V tejto fáze je teplota zvyšovaná na hranicu 185 - 230 °C po dobu 2 - 3 hodín. Škála maximálnej teploty je široká z dôvodu požadovaných finálnych vlastností dreva, kde podľa výšky teploty a expozičného času rozlišujeme dva typy finálneho produktu, Thermo-S a Thermo-D. Varianta Thermo-S je produktom modifikovaným pri teplotách okolo 190 °C a jeho využitie slúži najmä pre interiér. Thermo-D je na druhu stranu produktom vyšších teplôt, okolo hodnoty 215 a viac °C. Táto modifikácia je charakteristická predovšetkým vyššou tvarovou stabilitou a odolnosťou voči biotickým a abiotickým činiteľom, čo ju predurčuje na použitie v exteriéri.

3. fáza - chladenie a úprava vlhkosti

Tretia fáza procesu je charakteristická pozvoľným znižovaním teploty do hodnôt 90 - 100 °C za stáleho prívodu rozprašovanej vody či pary (ako v každej fáze termickej modifikácie) ktorá dopomáha k zabráneniu tvorbe trhlín v dreve.

Celý proces tepelnej modifikácie je ukončený tepelnou a vlhkosťou stabilizáciou, pri ktorej sa obvykle nechá produkt odpočívať v teplých zastrešených priestoroch po dobu 1 - 2 dni



Obrázok č.3. Fázy výroby thermowoodu (Thermowood Handbook, 2003)

3.3. Starnutie dreva

Na prirodzené starnutie dreva a predovšetkým na jeho vlastností majú najväčší vplyv biotické a abiotické činitele. Medzi biotické činitele zaraďujeme mikroorganizmy, drevokazné a drevosfarbujúce huby a drevokazný hmyz (Levy, 1987). Pri umelom starnutí dreva v UV-komore vieme predísť napadnutiu dreva drevokazným hmyzom a hubami pričom sme schopný sledovať vplyv iba abiotických činiteľov na drevo v čase. Medzi tieto činitele zaraďujeme:

- Vplyv teploty
- Vplyv vody a vlhkosti
- Vplyv slnečného žiarenia
- Vplyv prachových častíc a vetra

3.3.1. Vplyv teploty

Drevo je prírodný materiál ktorý reaguje na okolité zmeny v prostredí, medzi ktoré zaraďujeme aj zmeny teploty ovzdušia. Zvýšená teplota vonkajšieho prostredia najviac ovplyvňuje drevo z pohľadu nerovnomerných zmien vlhkosti dreva čo môže mať za následok zmenu vnútorného napätia a následný vznik trhlín v dreve.

Teplota dreva ovplyvňuje taktiež jeho rozmery. So zvyšujúcou sa teplotou narastá energia molekúl dreva a tým sa zvyšujú aj jeho rozmery. Podľa Požgaja a kol. (1997) však môžeme teplotné zmeny rozmerov dreva zanedbať, keďže v porovnaní s vlhkosťnými zmenami rozmerov dreva sú zanedbateľne malé.

3.3.2. Vplyv vody a vlhkosti

Drevo je v prírode neustále vystavované vode, či už priamo v podobe dažďa či snehovým prehánok, alebo nepriamo, kedy je vystavované prirodzeným zmenám vlhkosti prostredia. Drevo je hygroskopický materiál čo znamená, že je schopné prijímať vlhkosť z vonkajšieho prostredia a taktiež mu ju odovzdávať, čo má za následok zmenu jeho správania sa a jeho fyzikálnych a mechanických vlastností. Zmeny vlhkosti dreva majú najväčší vplyv na zmenu jeho rozmerových vlastností, ktoré rozdeľujeme na napúčanie a zosychanie. Pod

pojmom zosychanie dreva rozumieme proces pri ktorom sa v dôsledku úbytku viazanej vody znižujú rozmery dreva. Zosychanie dreva je definované v rozhraní vlhkostí dreva od 0% vlhkosti dreva až po vlhkosť bodu nasýtenia vlákien (BNV), ktorému môžeme priradiť orientačnú hodnotu približne 30 %. Nakoľko je drevo anizotropný materiál, jeho rozmerová stálosť je rozdielna v každom smere a je dostatočne veľká na to, aby sme s ňou počítali v každom prípade. Celkové zoschnutie (zoschnutie od BNV do absolútne suchého stavu) je minimálne v smere vlákien (0,1 - 0,6 %). V radiálnom smere nadobúda hodnôt 3 - 6 % a maximálne hodnoty (6 - 12 %) nadobúda v smere tangenciálnom. Javom opačným k zosychaniu je napúčanie. Napúčaním dreva teda rozumieme schopnosť dreva zväčšovať svoje rozmery pomocou prijímania viazanej vody, teda pri zmenách jeho vlhkosti od stavu absolútne suchého až do stavu BNV. Veľkosť napúčanie je závislá od rôznych činiteľov, medzi ktoré môžeme zaradiť hustotu dreva, jeho štruktúru či vonkajšiu teplotu. V číselných hodnotách sa však napúčanie dreva veľmi podobá zosychaniu. (Niemz, Sonderegger, 2003; Požgaj a kol. 1997).

3.3.3. Vplyv slnečného žiarenia

Drevo je prírodný materiál reagujúci na vonkajšie prostredie rôznymi spôsobmi, ako napríklad zmenou rozmerov a iných mechanických vlastností, tak aj postupnou zmenou farby pri pôsobení slnečného žiarenia. Tento proces sa nazýva fotodegradácia dreva. Najväčší vplyv na zmenu farby dreva má ultrafialová (ďalej UV) zložka slnečného žiarenia pôsobiaca na najmä na lignín, ktorý je zo všetkých zložiek dreva najnáchylnejší na zmenu farby, kedy má pri dlhšej expozícii slnečného žiarenia tendenciu žltnúť, pričom pre staré drevo ako celok je typická sivá farba. Nakoľko sa pri vystavení dreva slnečnému žiareniu nemenia jeho mechanické vlastnosti, môžeme podľa Horáčka (2001) fotodegradáciu zaradiť medzi povrchové javy.

3.3.4. Vplyv nečistôt a vetra

Najväčší vplyv vetra ako samostatného činiteľa spočíva v prúdení vzduch okolo drevenej plochy a teda v prevetrávaní povrchu dreva ktoré napomáha k rýchlejšiemu vyrovnávaniu vlhkosti dreva, čím napomáha jeho rozmerovej stabilite a mechanickým

vlastnostiam. Na druhej strane však dokáže vietor v súčinnosti s inými činiteľmi pôsobiť veľmi škodlivo, kedy synergickým efektom napríklad so snehovými vločkami či inými nečistotami, dokáže zaniest' tieto škodlivé častice aj na miesta zložitejšieho prístupu. V prípade zanesenia prachových častíc do mikrotrhlín môže pri spolupôsobení času a vlhkosti drevo vytvárať vhodné podmienky pre rast drevokazných húb a pliesni, ktoré majú na drevo nežiaduce, drevosfarbujúce alebo, v horšom prípade, drevokazné účinky.

3.4. Skúmané fyzikálne vlastnosti

Základným cieľom tejto bakalárskej práce je posúdiť vplyv starnutia tepelne upraveného dreva jedle obrovskej na jeho teplotné charakteristiky. Čiastkovým cieľom je taktiež sledovať zmenu farby a lesku dreva v priebehu starnutia a taktiež prihliadnutie na jeho fyzikálne vlastnosti, najmä zmeny hustoty a vlhkosti počas starnutia.

3.4.1. Hustota a vlhkosť

Hustota

Hustota dreva patrí medzi najzákladnejšie a zároveň najdôležitejšie charakteristiky dreva, nakoľko má enormný vplyv na fyzikálne, no predovšetkým mechanické vlastnosti drevín. V základe platí úvaha, že čím je drevo hustejšie a teda ťažšie, tým je pravdepodobnejšie, že aj jeho mechanické vlastnosti budú lepšie. Hustota dreva však ovplyvňuje aj veľké množstvo iných vlastností, ktoré sú dôležité pre rozdelenie drevín a ich následné použitie pre rôzne účely, na ktoré majú, aj s dôrazom na ich hustotu, predpoklady (Požgaj a kol. 1997).

Pod pojmom hustota dreva pri vlhkosti w rozumieme vzťah medzi hmotnosťou a objemom istej vzorky dreva vyjadrenej vzťahom:

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

kde:

ρ_w = hustota dreviny pri vlhkosti w ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$),

m_w = hmotnosť vzorky pri vlhkosti w (kg),

V_w = objem vzorky pri vlhkosti w (m^3).

Postup merania hustoty dreva vychádza z platnej normy ČSN 49 0108 za uvedených podmienok absolútnej vlhkosti prostredia 65 % a teploty prostredia 20 °C, ktorým odpovedá vlhkosť dreva 12 % (Bárta, 2021).

Hustota dreva je ovplyvňovaná množstvom faktorov. Za najdôležitejší faktor ovplyvňujúci hustotu dreva možno považovať pôdu a prostredie, v ktorom strom rastie. Kvalitná prevzdušnená pôda plná živín ovplyvňuje hustotu v pozitívnom smere, pričom napríklad sklon svahu, chladné prostredie či vysoká nadmorská výška môžu ovplyvňovať hustotu dreva v negatívnom zmysle. V rámci makroštruktúry dreva podľa Horáka (2021) ovplyvňujú hustotu dreva najmä podiel jarného a letného dreva, šírka letokruhov a samozrejme vlhkosť dreva.

Vlhkosť

Množstvo vody nachádzajúcej sa v dreve určujeme pomocou vlhkosti. Tá nám udáva percentuálny pomer hmotnosti vody a celkovej hmotnosti dreva, ktorého vlhkosť určujeme. V takomto prípade sa rozprávame o relatívnej vlhkosti dreva. Na druhej strane, poznáme aj pojem absolútna vlhkosť dreva, ktorá nám označuje percentuálny pomer hmotnosti vody a absolútne suchého dreva. Obe tieto vlhkosti definujú vzťahy (Požgaj a kol, 1997) :

$$w_a = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (2)$$

$$w_r = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 \quad (3)$$

kde:

w_a = absolútna vlhkosť (%),

w_r = relatívna vlhkosť (%),

m_0 = hmotnosť dreva v absolútne suchom stave (g),

m_w = hmotnosť dreva pri vlhkosti w (g).

V praxi sa častejšie stretáme s relatívnou hustotou, nakoľko je jednoduchšia na zisťovanie. Pre jednoduchšie výpočty a premeny medzi absolútnou a relatívnou hustotou sa zovšeobecnil vzorec pre túto premenu:

$$w_a = \frac{100 \cdot w_r}{100 - w_r} \quad (4)$$

$$w_r = \frac{100 \cdot w_a}{100 + w_a} \quad (5)$$

kde:

w_a = absolútna vlhkosť,

w_r = relatívna vlhkosť.

3.4.2. Tepelné charakteristiky

Prenos tepla v dreve jeho štúdium má vysokú dôležitosť pri správaní sa dreva v rôznych situáciách, pri pochopení jeho tepelných vlastností a pri následnom využití dreva v praxi. Prenos tepla v dreve obvykle nastáva všetkými tromi základnými formami prenosu tepla a to kondukciou, konvekciou a radiáciou. Nakoľko je v reálnom svete podiel konvekcie a radiácie voči kondukcii relatívne malý, v praxi sa pre zjednodušenie počíta len s kondukciou tepla drevom a ostatné formy prenosu tepla sa priradujú k odchýlke.

Vedenie tepla je vyjadrenie schopnosti materiálu prenášať teplo z miesta s vyššou teplotou do miesta s nižšou teplotou. Vedenie tepla tuhou látkou a teda aj drevom sa obvykle opisuje Fourierovým zákonom v základnom tvare:

$$q = -\lambda \cdot \Delta T \quad (6)$$

z čoho následne:

$$\lambda = -\frac{q}{\Delta T} \quad (7)$$

kde:

q = vektor hustoty tepelného toku ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}$),

ΔT = rozdiel teplôt (K),

λ = súčiniteľ tepelnej vodivosti ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

Súčiniteľ tepelnej vodivosti (tepelná konduktivita)

Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ patrí medzi najdôležitejšie tepelné súčinitele, ktorý je charakteristický pre každý materiál. Udáva množstvo tepla, ktoré, prejde telesom jednotkového prierezu za jednotku času, aby na jednotku dĺžky bol jednotkový teplotný spád (Ho a kol, 2009). Poznanie hodnôt súčiniteľa tepelnej vodivosti pre drevo je veľmi podstatné z dôvodu praktického využitia drevnej hmoty. Hodnota λ_d pre drevo sa podľa Požgaja a kol (1997) pohybuje v reláciách od 0,1 do 0,42 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pre porovnanie, λ_z pre zlato má hodnotu 317 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, λ_o pre olovo = 35,3 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, λ_p pre PUR izoláciu = 0,037 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a pre vodu $\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 0,607 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Z toho vyplýva, že drevo nedokáže dobre viesť teplo a preto ho zaradujeme medzi relatívne dobré tepelné izolanty, čo sa využíva napríklad pri drevostavbách, kedy bývajú drevené celé stavebné konštrukcie.

Súčiniteľ teplotnej vodivosti (tepelná difuzivita)

Súčiniteľ teplotnej vodivosti alfa je koeficient charakteristický pre každý tuhý materiál, vychádzajúci práve z tepelnej vodivosti materiálu. Je definovaný vzťahom:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (8)$$

kde:

α = súčiniteľ teplotnej vodivosti ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$),

λ = koeficient tepelnej vodivosti ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),

c = merná tepelná kapacita ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

ρ = hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Ako ukazuje vzorec (8), je definovaný podielom koeficientu tepelnej vodivosti a súčinu hustoty a mernej tepelnej kapacity materiálu (Mishra, Militky, 2019). Súčiniteľ teplotnej vodivosti teda popisuje rýchlosť vyrovnávania sa rozdielov teplôt v materiáli. Čím je hodnota vyššia, tým je materiál schopný rýchlejšie viesť teplo. Podľa Suleimana a kol. (1999) hodnota koeficientu závisí od stavu telesa, a to konkrétne od jeho teploty a vlhkosti.

Objemová tepelná kapacita

V termodynamike je merná tepelná kapacita c definovaná ako tepelná kapacita látky vzťahnutá na jej hmotnosť. Udáva nám teda množstvo tepla, ktoré musí teleso o jednotkovej hmotnosti prijať alebo odovzdať, aby sa jeho teplota zvýšila alebo znížila o 1 Kelvin. Súčin $\rho \cdot c$ zo vzorca (8) poznáme ako objemovú tepelnú kapacitu udávanú v $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. Tento súčin nám udáva množstvo tepla, ktoré musí teleso jednotkového objemu prijať alebo odovzdať, aby zvýšilo, resp. znížilo svoju teplotu o 1 K.

3.4.3. Optické vlastnosti

Farba

Farba dreva je povrchová optická vlastnosť, ktorej význam stúpa pri dreve použitom na obkladové plochy či nábytok alebo pri dreve využívanom na špeciálne účely, akými sú športové potreby, hudobné nástroje, hračky a predovšetkým rôzne dekoratívne drevené predmety (Požgaj a kol, 1997). Človek je schopný vnímať žiarenie s vlnovou dĺžkou od 380 nm až do 790 nm čomu zodpovedá celé farebné spektrum viditeľné ľudským okom. Pre drevo typickému sfarbeniu, od svetlo žltohnedej až po tmavšiu hnedú prislúcha žiarenie o vlnovej

dĺžke 470 - 490 nm, ktoré drevo emituje a tak ho môžeme vidieť práve v týchto farbách (Gérard a kol, 2012).

Farba a jej odtieň je pre každú drevinu jedinečný, od svetlého dreva brezy či lipy, cez svetlohnedý smrek, cez typicky červenkastú čerešňu, sivastý orech až po tmavé drevo agátu. Farbu dreva ovplyvňujú najmä celulóza, hemicelulózy a lignín, ktoré dávajú drevu základnú farbu, ktorá je následne bližšie ovplyvňovaná vedľajšími látkami, ako sú napríklad terpentíny, extraktíva a triesloviny, ktoré dodávajú každému drevu jeho typickú farbu (Požgaj a kol. 1997). O presné a objektívne posudzovanie farieb sa stará kolorimetria, ktorá využíva na určenie farby tzv. trichromatickú sústavu CIE, pomocou ktorej je schopná každej farbe prideliť pozíciu na farebnom diagrame L^*a^*b a určením svetlosti jej priradiť jedinečnú súradnicu (Hongli, Weihua, 2013).



Obrázok č. 4. Meranie farby spektrofotometrom VTL CM-600D určujúcim farbu pomocou L^*a^*b diagramu (vlastné)

Lesk

ČSN EN ISO 2813 (2016) definuje lesk ako optickú vlastnosť povrchu, vďaka ktorej je schopný zrkadlovo odrážať svetlo. Nameraná hodnota lesku povrchu nám udáva pomer svetelného toku odrazeného od meraného povrchu a svetelného toku odrazeného od povrchu skla. Pre jednoduchú interpretáciu a škálovateľnosť lesku, ČSN EN ISO 2813 (2016) uvádza

stupnicu obsahujúcu 7 úrovni lesku povrchu a to konkrétne: vysoký lesk, lesk, hodvábný lesk, pololesk, saténový lesk, mat a hlboký mat (Čiháková, 2019).

4. Metodika

4.1. Príprava vzoriek

Všetky vzorky použité v tejto bakalárskej práci bolo použité drevo Jedle obrovskej (*Abies Grandis*) pochádzajú z oblasti Kostelce nad Černými lesy z Českej Republiky. Na prípravu vzoriek boli použité fošne prevažne z oddenkovej časti kmeňa. Fošne boli po vymanipulovaní uložené do hraní v ktorých boli vystavené prirodzenému vysušeniu. Po poklese a následnom ustálení vlhkosti boli fošne pozdĺžne rozdelené na dve dosky, z ktorých boli následným skracovaním vyhotovené konečné vzorky v rozmeroch 20x100x300 mm. Vzorky vyhotovené z jednej dosky boli predurčené na úpravu pri 180 °C, pričom vzorky z druhej dosky boli použité na úpravu pri 200 °C. Všetky vzorky boli po vyhotovení a dôkladnom skontrolovaní uložené do klimatickej komory HPP 750 klimatizujúcej pri teplote 20 °C a vzdušnej vlhkosti 65 %, pri ktorých sa uložené vzorky po určitom čase ustálili na vlhkosti 12 %.

4.2. Tepelná úprava vzoriek

Tepelná úprava vzoriek dreva pomocou metódy thermowoodu slúžila ako finálna úprava vzoriek pred začiatkom meraní. Vzorky boli na základe zadania rozdelené na dva skupiny podľa teploty úpravy a následne premiestnené do Kostelca nad Černými lesy kde sa nachádza komora, v ktorej celá tepelná úprava prebiehala. Priebeh celej úpravy prebiehal v troch fázach. Počiatočný prudký ohrev na teplotu 40 °C bol nasledovaný pozvoľným zohrievaním rýchlosťou 15 °C.h⁻¹ až na teplotu 130 °C. Posledná fáza ohrevu na 180 °C resp. 200 °C prebiehala rýchlosťou 20 °C.h⁻¹. Fáza samotnej modifikácie pri požadovanej teplote trvala v oboch prípadoch 3 hodiny. Následná fáza ochladzovania prebiehala za postupného znižovania teploty rýchlosťou 25 °C.h⁻¹. Pri dosiahnutí teploty 130 °C začala byť do komory postupne privádzaná vodná para na mierne zvyšovanie vlhkosti, ktorým je ktorým je

znižovaná náchylnosť dreva na praskanie. Celý proces tepelnej úpravy trval približne 18 hodín pre 180 °C a 20 hodín pre 200 °C.

4.3. Meranie vzoriek pred starnutím

Prvá fáza merania spočívala v nameraní skúmaných vlastností dreva pred jeho starnutím. Vzorky boli rozdelené do troch skupín, a to vzorky upravené pri 180 °C, vzorky upravené pri 200 °C a referenčné vzorky bez tepelnej úpravy. Všetky vzorky boli až do prevádzania uchovávané v termickej komore, v ktorej nadobudli približne 12% vlhkosť. Pri tejto ustálenej vlhkosti boli vzorky pripravené. Meranie začalo zisťovaním rozmerov každého vzorku. Rozmery boli zisťované pomocou posuvného meradla s presnosťou na 0,01 mm a to v každom smere na troch rôznych miestach. Vo výpočtoch sa následne počítalo s priemernou hodnotou nameraných hodnôt v rámci každej vzorky. Hmotnosť vzoriek bola meraná na váhach s presnosťou na 0,01 g. Hodnoty rozmerov a hmotností boli následne použité na vypočítanie hustoty každej vzorky podľa vzťahu:

$$\rho = \frac{m}{h \cdot \text{š} \cdot d} \cdot 1000000 \quad (9)$$

kde:

ρ = hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),

m = hmotnosť (g),

$h, \text{š}, d$ = hrúbka, šírka, dĺžka (mm).

Hustota vzoriek bola vypočítaná kvôli následnému porovnaniu prípadnej zmeny hustoty v priebehu starnutia.

Ako doplnkové vlastnosti zisťované počas experimentu boli farba a lesk. Na zisťovanie farby bol použitý spektrofotometer VTL CM-600D (Konica Minolta, Osaka, Japonsko) ktorý zisťuje farbu na základe farebného L^*a^*b diagramu. Leskomer MG268-F2 (KSJ, Quanzhou, Čína) bol použitý na meranie lesku povrchu vzoriek a to konkrétne pod uhlami 60° a 85°, ktoré prístroj od výrobcu KSJ ponúka.

Hlavnou témou tejto bakalárskej práce je zisťovanie tepelných charakteristík, ktoré prebiehalo kompletne pomocou prístroja ISOMET 2114 (Applied Precision., Bratislava, Slovensko), ktorého veľkou prednosťou je schopnosť meranie všetkých troch potrebných koeficientov (α , λ , c) naraz. Plošná sonda generujúca tepelnú energiu je v neustálom kontakte s povrchom skúmaného materiálu a sleduje jeho odozvu na emitujúcu energiu. Pri maximálnom rozdieli teplôt 10 K dokáže tento prístroj vyhodnotiť všetky potrebné tepelné charakteristiky dreva. Na každej vzorke boli vyhradené 3 miesta bez sukov či iných väd, pričom na každom z nich prebehli dve série meraní pre vyššiu objektivitu výsledkov.



Obrázok č. 5. ISOMET 2114 použitý na meranie tepelných charakteristík (vlastné)

4.4. Starnutie

Po nameraní prvotných dát boli vzorky premiestnené do UV-komory QUV Accelerated weather tester (Q-Lab, Cleveland, OH, USA), ktorá dokáže veľmi efektívne simulovať podmienky vonkajšieho prostredia. Vzorky boli rozdelené na dve skupiny po 18 kusov z dôvodu kapacity komory. Simulácia starnutia spočívala v neustálom opakovaní trojhodinového cyklu, počas ktorého sa priebežne kolísala teplota medzi hodnotami 20 ± 1 °C až 65 ± 3 °C. Jeden takýto cyklus pozostával z dvoch podcyklov, kedy boli v prvom podcykle vzorky vystavené UV žiareniu o intenzite $1,1 \text{ W.m}^{-2}$ a vlnovej dĺžke 340 nm bez vodného

spreju po dobu 2,5 h. Počas druhého podcyklu boli naopak vzorky vystavené 0,5 hodiny vodnému spreju bez pôsobenia UV žiarenia. Celkový čas vystavenia vzoriek takémuto cyklu v UV komore prebiehal po dobu 720 h, pričom v polovici cyklu, teda po 360 hodinách boli vzorky otočené aby boli splnené rovnaké podmienky pre obidve skúmané tangenciálne plochy vzoriek.



Obrázok č. 6. Porovnanie vizuálu rôzne upravených vzoriek. Zľava (bez tepelnej úpravy pred starnutím, bez tepelnej úpravy po starnutí, tepelná úprava pri 180 °C po starnutí, tepelná úprava pri 200 °C po starnutí (vlastné))

4.5. Meranie vzoriek po starnutí

Po procese starnutia boli vzorky opäť uložené do klimatickej komory až do ustálenia hmotnosti a teda aj ustálenia vlhkosti pri rovnakých podmienkach prostredia v komore, a to vlhkosti vzduchu 65 % a teplote 20 °C. Po dostatočnom aklimatizovaní následne prebehlo druhé meranie, ktoré bolo identické ako to pred starnutím. Všetky výsledky merania hmotnosti, rozmerov, farby, lesku a všetkých tepelných charakteristík boli dôkladne zaznamenaná a pripravené na ďalšie použitie. Obidve merania prebiehali v klimatizovanej miestnosti o stálej teplote a vlhkosti pre maximalizáciu presnosti výsledkov.

Zmena farby pred a po starnutí bola vyhodnocovaná podľa zaužívaného vzorca odpovedajúceho pre zmenu farby v L*a*b diagrame:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + \Delta b^2} \quad (10)$$

kde:

ΔE = farebná zmena,

L = svetlosť (čierna \leftrightarrow biela),

a = farebná škála (zelená \leftrightarrow červená),

b = farebná škála (modrá \leftrightarrow žltá).

4.6. Vyhodnotenie dát

Výsledky meraní boli zaznamenávané v tabuľkovej forme v programe Microsoft Office Excel 2007 v ktorej boli následne pripravované na ich ďalšie tabuľkové a grafické vyhodnotenie v programe Statistica 14.0. Na číselné vyhodnotenie výsledkov bola použitá popisná štatistika a na ich grafické vyobrazenie jednofaktorová a dvojfaktorová analýza rozptylu ANOVA ktorá určuje štatistickú významnosť. V našom prípade sme touto analýzou vyhodnocovali výsledky s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$.

5. Výsledky a diskusia

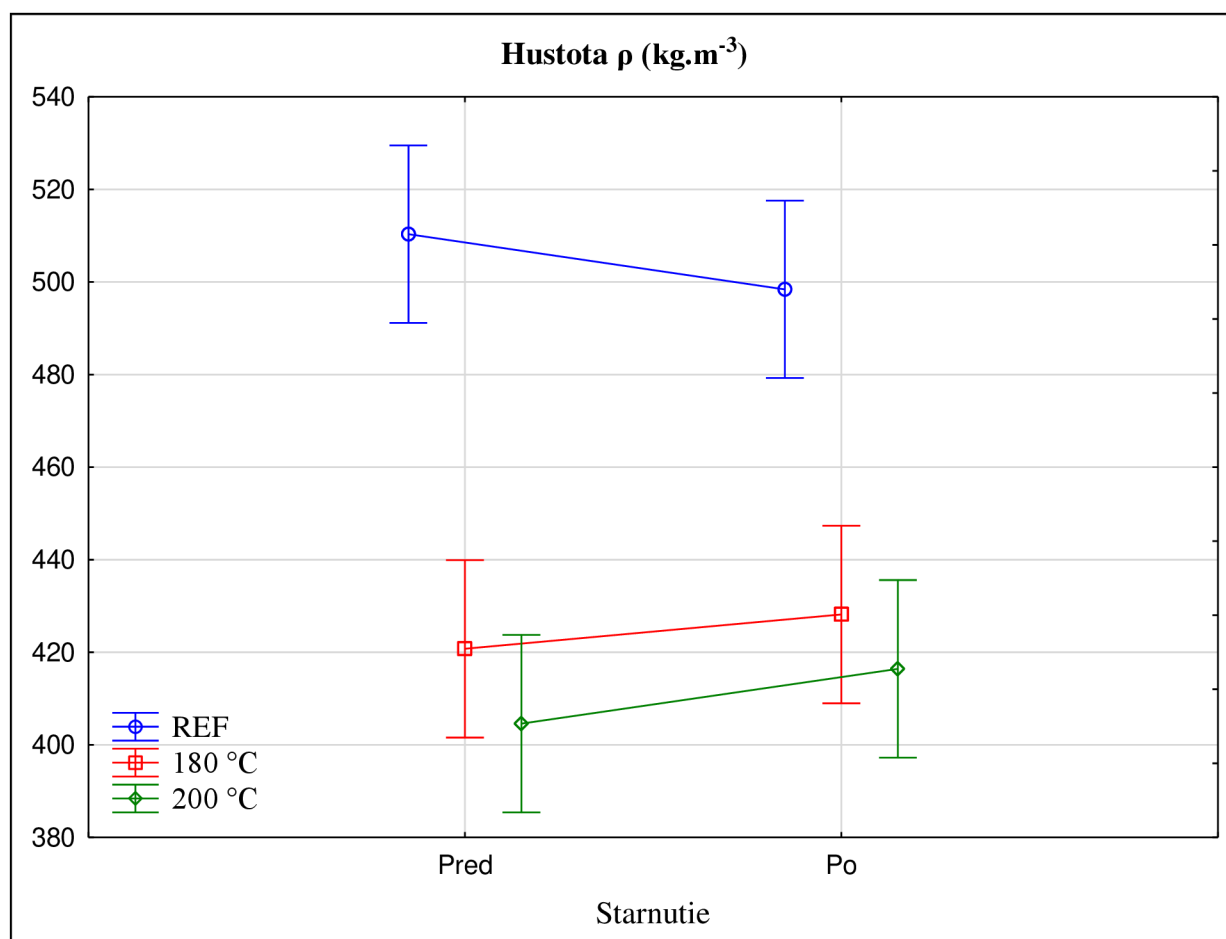
Hustota

Počas vyhodnocovania výsledkov nás prekvapila vysoká hodnota hustoty dreva jedle obrovskej v oblastiach Českej republiky, nakoľko Zeidler a kol. (2010) udávajú hustotu jedle obrovskej $\rho = 407 \text{ kg.m}^{-3}$ pričom nami nameraná a vypočítaná hodnota pri rovnakých podmienkach ovzdušia je $\rho = 510 \text{ kg.m}^{-3}$. Tento rozdiel môže byť spôsobený napríklad vyšším podielom dreva či kvalitnejšou, pomalšie rastúcou surovinou ktorá si dokázala udržať vyššiu hustotu, čo potvrdzuje aj Horák (2020) ktorý udáva hustotu jedle obrovskej $\rho = 496 \text{ kg.m}^{-3}$. Z tabuľky č. 1 vidíme rozdielne správanie sa hustoty počas starnutia v prípade tepelne upravených vzoriek a v prípade referenčných vzoriek. Pri referenčných, tepelne

neupravených vzorkách, je pokles hustoty spôsobený odbúravaním hemicelulóz v dreve, ktoré obsahujú relatívne veľké množstvo hydroxylových skupín, na ktoré sa voda poľahky viaže (Chang, Chang, 2002).

Tabuľka č. 1. Výsledky hustoty ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

| | Počet meraní | Priemer | Smerodajná odchýlka | Variačný koeficient | Minimum | Maximum |
|---------------|--------------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| REF (Pred) | 12 | 510 | 48 | 9 | 447 | 576 |
| 180 °C (Pred) | 12 | 421 | 21 | 5 | 385 | 460 |
| 200 °C (Pred) | 12 | 405 | 20 | 5 | 374 | 439 |
| REF °C (Po) | 12 | 498 | 49 | 10 | 434 | 562 |
| 180 °C (Po) | 12 | 428 | 24 | 6 | 388 | 473 |
| 200 °C (Po) | 12 | 416 | 22 | 5 | 379 | 451 |



Graf č. 1. Grafické zobrazenie zmeny hustoty pred a po starnutí

Mierny úbytok hemicelulóz spôsobený starnutím dreva teda znižuje jeho hygroskopicitu a môže mať za následok zníženie jeho hustoty v procese starnutia. V našom prípade sa hustota referenčných vzoriek znížila o necelé 3 %, čo podľa grafu č. 1 nie je štatisticky významná zmena. Tepelne upravené vzorky dreva metódou thermowood vstupovali do procesu starnutia s výrazne odlišnými vlastnosťami ako referenčné vzorky. Tepelná úprava má vysoký vplyv na hygroskopicitu dreva z dôvodu chemických zmien najmä v štruktúre hemicelulóz, ktoré majú za následok výrazne nižšiu hustotu tepelne upraveného dreva v porovnaní s referenčnými vzorkami. Proces starnutia však už na chemickú štruktúru thermowoodu nemá takmer žiadny vplyv a je štatisticky nevýznamný. Mierne navýšenie hustoty v procese starnutia mohlo mať za následok vplyv vody v UV-komore.

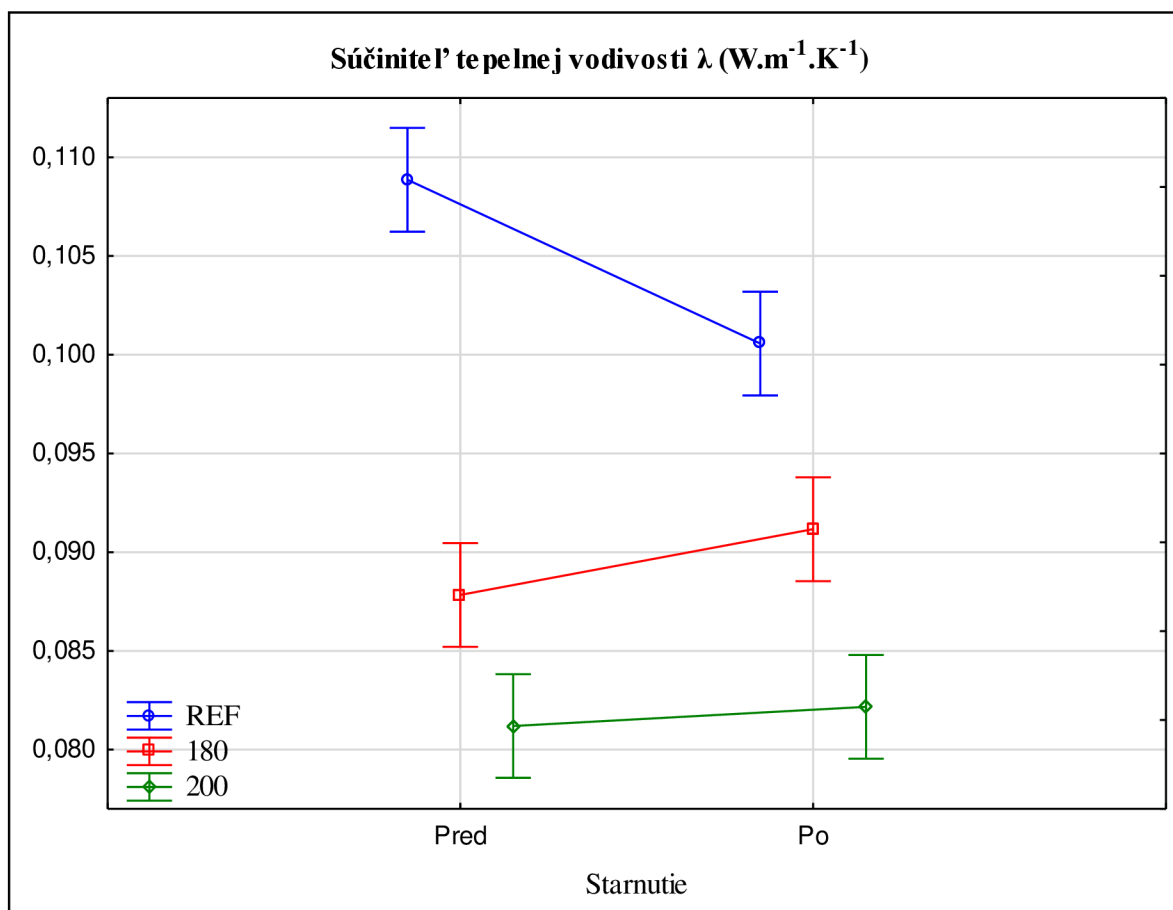
Súčiniteľ tepelnej vodivosti

Tabuľka č. 2 nám ukazuje výsledky merania zmeny tepelnej konduktivity dreva v procese starnutia. Podľa vzorca (8) vidíme, že tepelná konduktivita je podľa teórie priamo úmerná hustote dreva, čo nám ukazuje taktiež graf č. 2, na ktorom môžeme vidieť zmeny tepelnej konduktivity veľmi podobné práve zmenám hustoty z grafu č. 1. Pri referenčných vzorkách je tento pokles spôsobený práve zmenou hygroskopicity dreva a jeho nižšej rovnovážnej vlhkosti. Voda má totiž podľa (Bottomley, 1881) hodnotu λ pri teplote 20 °C $\lambda_{H_2O} = 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pri porovnaní s referenčným drevom, ktorého λ sa v našom prípade rovná približne $\lambda_d = 0,11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ môžeme konštatovať, že množstvo vody v dreve významne ovplyvňuje jeho konduktivitu.

Tabuľka č. 2. Výsledky tepelnej konduktivity λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

| | Počet meraní | Priemer | Smerodajná odchýlka | Variačný koeficient | Minimum | Maximum |
|---------------|--------------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| REF (Pred) | 72 | 0,1089 | 0,0163 | 14,97 | 0,0833 | 0,1480 |
| 180 °C (Pred) | 72 | 0,0878 | 0,0094 | 10,67 | 0,0724 | 0,1070 |
| 200 °C (Pred) | 72 | 0,0812 | 0,0056 | 6,87 | 0,0714 | 0,0895 |
| REF °C (Po) | 72 | 0,1006 | 0,0155 | 15,46 | 0,0776 | 0,1396 |
| 180 °C (Po) | 72 | 0,0912 | 0,0102 | 11,20 | 0,0753 | 0,1171 |
| 200 °C (Po) | 72 | 0,0822 | 0,0064 | 7,84 | 0,0702 | 0,0916 |

V našom prípade sa tepelná konduktivita referenčného dreva procesom starnutia znížila o približne 8 % čo považujeme za štatisticky významnú zmenu. V prípade tepelne upravených vzoriek vidíme výrazne odlišné hodnoty tepelnej konduktivity v porovnaní s referenčnými vzorkami, no výrazne nižší vplyv na thermowood má starnutie. Z grafov č. 1 a 2 vidíme vysokú závislosť koeficientu λ thermowoodu na hustote.



Graf č. 2. Grafické zobrazenie zmeny súčiniteľa tepelnej vodivosti pred a po starnutí

Pri vzorkách upravených pri 200 °C vidíme štatisticky nevýznamnú zmenu o približne 1 %. Pri vzorkách upravených pri 180 °C je rozdiel tepelnej konduktivity pred a po starnutí na hranici významnosti. Zmena o necelé 4 % bola spôsobená práve zvýšením hustoty dreva a taktiež menšou zmenou kryštalinity hemicelulózy ako pri úprave pri 200 °C. Vyššia teplota úpravy podľa predpokladov napomáha k vyššej stabilizácii či už fyziologických, tak aj mechanických vlastností dreva.

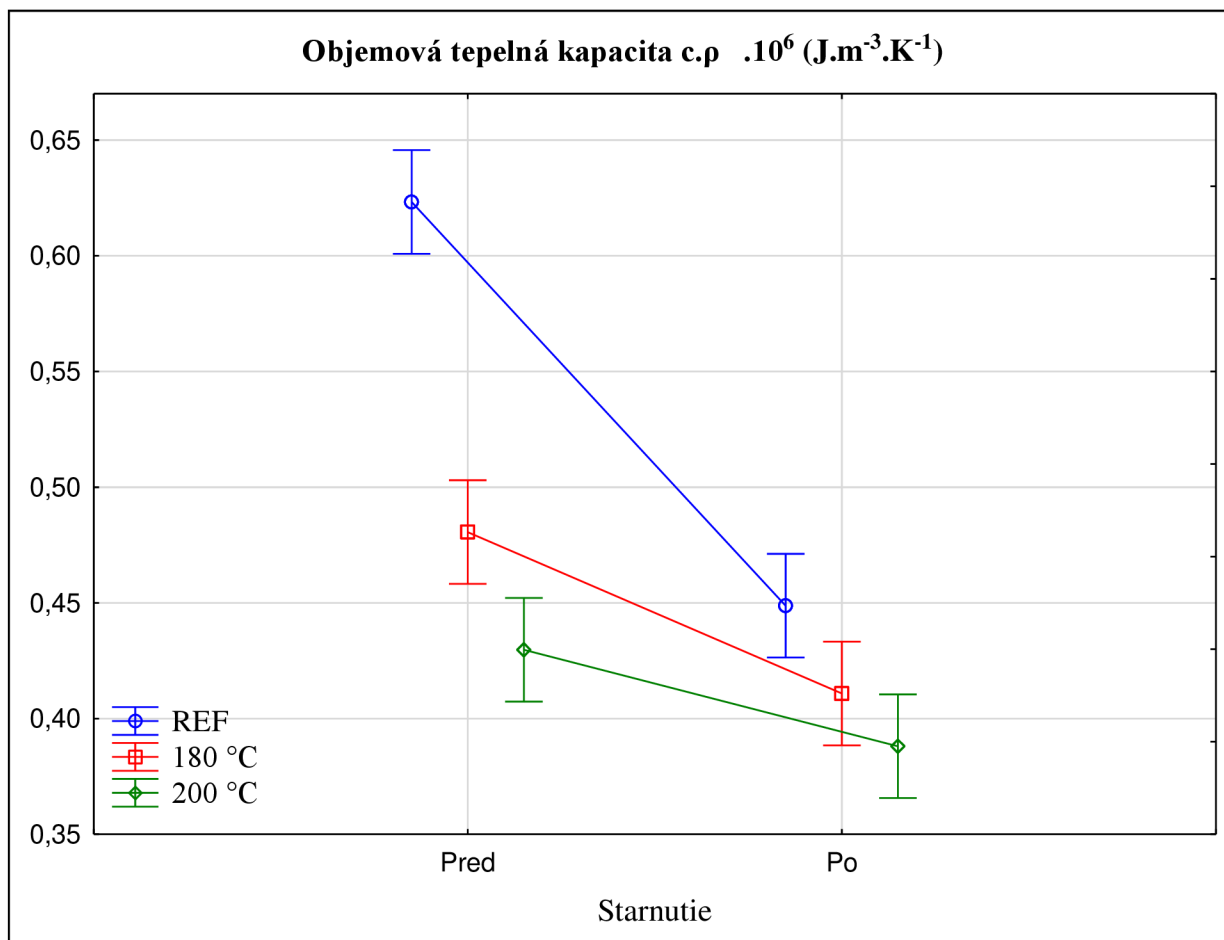
Objemová tepelná kapacita

V prípade objemovej tepelnej kapacity vidíme výraznú zmenu v priebehu procesu starnutia. Najväčšia zmena nastala v prípade referenčných, tepelne neupravených vzoriek, ktorých objemová tepelná kapacita sa v priebehu starnutia znížila v priemere o približne 28 % čo považujeme za veľmi výraznú zmenu, čo má za následok predovšetkým pokles vlhkosti dreva počas starnutia. Hodnotu objemovej tepelnej kapacity vody udáva (Bottomley, 1881) $c_{pH_2O} = 4,18 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ pričom nami nameraná hodnota pre referenčné drevo jedle obrovskej pred starnutím je $c_{pj} = 0,62 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$. Z vedomosti že voda má približne 6,5x vyššiu objemovú tepelnú kapacitu ako drevo jedle obrovskej môžeme konštatovať, že vlhkosť dreva bude mať výrazný vplyv na hodnotu c_p . Za predpokladu 12% vlhkosti referenčných vzoriek po aklimatizácii v podmienkach 65% vzdušnej vlhkosti a teplote 20 °C pred starnutím ich vlhkosť v priebehu starnutia poklesla na hodnotu približne 8 %, čo je výrazný rozdiel, ktorý významne ovplyvnil hodnotu objemovej tepelnej kapacity vzoriek.

Tabuľka č. 3. Výsledky objemovej tepelnej kapacity $c_p \cdot 10^6 \text{ (J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1})$

| | Počet meraní | Priemer | Smerodajná odchýlka | Variačný koeficient | Minimum | Maximum |
|---------------|--------------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| REF (Pred) | 72 | 0,6232 | 0,13207 | 21,19 | 0,4518 | 0,8977 |
| 180 °C (Pred) | 72 | 0,4806 | 0,06980 | 14,52 | 0,3541 | 0,6303 |
| 200 °C (Pred) | 72 | 0,4298 | 0,05391 | 12,54 | 0,3062 | 0,5259 |
| REF °C (Po) | 72 | 0,4488 | 0,12770 | 28,46 | 0,2490 | 0,7525 |
| 180 °C (Po) | 72 | 0,4109 | 0,08750 | 21,30 | 0,2475 | 0,5913 |
| 200 °C (Po) | 72 | 0,3880 | 0,08304 | 21,40 | 0,2169 | 0,5784 |

Pri tepelne upravených vzorkách je pokles menší, konkrétne u vzoriek upravovaných pri 180 °C je tento pokles 15% a u vzoriek upravovaných pri 200 °C je tento pokles 10 %. Menší pokles u tepelne upravovaných vzoriek je spôsobený vyššou stabilitou tepelných vlastností thermowoodu, ktorý je spôsobený predovšetkým nižšou rovnovážnou vlhkosťou pri klimatizovaní vzoriek a taktiež zmenou kryštalinity hemicelulózy ktorá bráni viazaniu vody a tým pádom znižuje tepelnú kapacitu dreva.



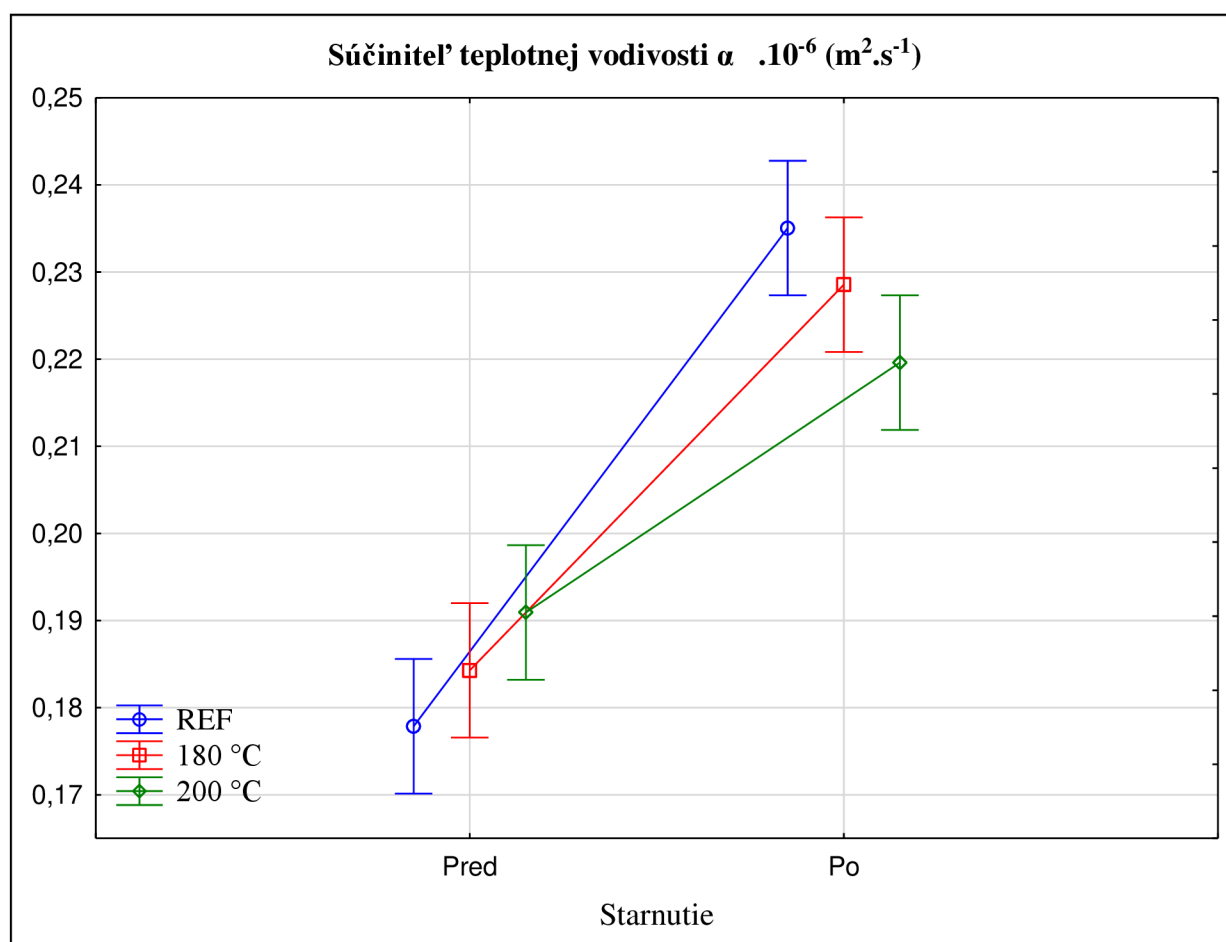
Graf č. 3. Grafické zobrazenie zmeny objemovej tepelnej kapacity pred a po starnutí

Súčiniteľ teplotnej vodivosti

Zmena súčiniteľa teplotnej difuzivity je predovšetkým závislá od zmeny ostatných tepelných charakteristík, nakoľko je podľa vzorca (8) priamoúmerná súčiniteľu tepelnej vodivosti a nepriamoúmerná objemovej tepelnej kapacite. Z grafov 3 a 4 je táto nepriama úmera voči objemovej tepelnej kapacite podľa predpokladov veľmi dobre badateľná.

Tabuľka č. 4. Výsledky tepelnej difuzivity $\alpha \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$

| | Počet meraní | Priemer | Smerodajná odchýlka | Variačný koeficient | Minimum | Maximum |
|---------------|--------------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| REF (Pred) | 72 | 0,1779 | 0,0225 | 12,65 | 0,1397 | 0,2319 |
| 180 °C (Pred) | 72 | 0,1843 | 0,0159 | 8,63 | 0,1485 | 0,2396 |
| 200 °C (Pred) | 72 | 0,1909 | 0,0201 | 10,54 | 0,1647 | 0,2790 |
| REF °C (Po) | 72 | 0,2351 | 0,0498 | 21,21 | 0,1594 | 0,3678 |
| 180 °C (Po) | 72 | 0,2285 | 0,0365 | 15,98 | 0,1655 | 0,3208 |
| 200 °C (Po) | 72 | 0,2196 | 0,0411 | 18,71 | 0,1404 | 0,3439 |



Graf č. 4. Grafické zobrazenie zmeny súčiniteľu teplotnej vodivosti pred a po starnutí

V prípade referenčných vzoriek sme namerali a vypočítali nárast súčiniteľa teplotnej vodivosti v procese starnutia o približne 32 %. V prípade vzoriek upravovaných pri teplote 180 °C sme zaznamenali nárast o 24 % a pri vzorkách upravovaných pri teplote 200 °C sme zistili nárast o 15 %.

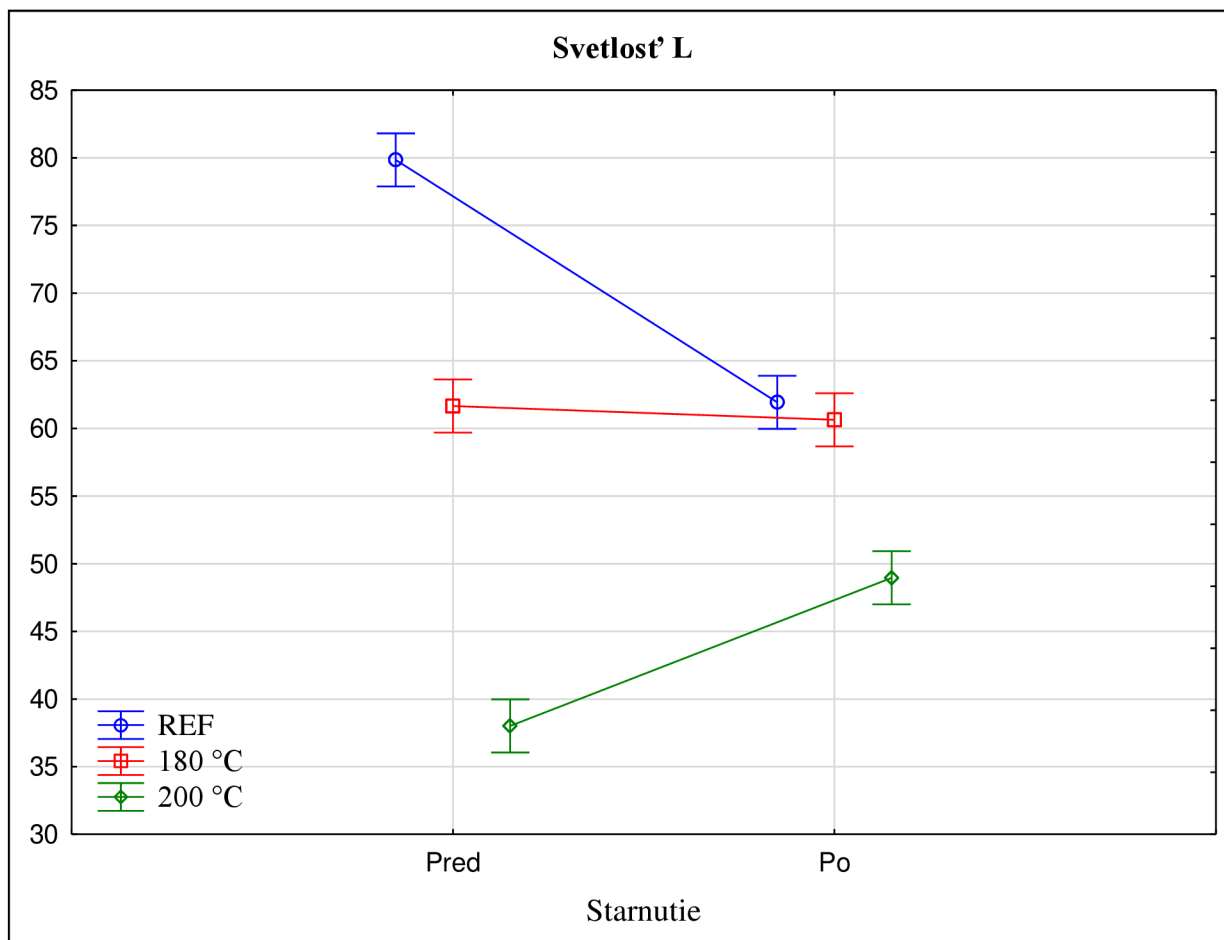
Farba

Svetlosť dreva sa vo všetkých troch prípadoch správal počas starnutia predpokladaným spôsobom a to postupným blížiením sa jej hodnoty k rozhranie 50 – 60 ktoré odpovedá sivej farbe, ktorá je typická pre neošetrené drevo dlhodobo vystavené vonkajším podmienkam. V prípade referenčných vzoriek sa teda jednalo o stmavnutie o približne 18 bodov, pričom u vzoriek upravovaných pri 200 °C sme namerali zosvetlenie o približne 11 bodov, ktoré bolo spôsobené najmä UV žiarením.

Tabuľka č. 5. Výsledky svetlosti

| | Počet meraní | Priemer | Smerodajná odchýlka | Variačný koeficient | Minimum | Maximum |
|---------------|--------------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| REF (Pred) | 60 | 79,85 | 3,09 | 3,87 | 72,79 | 84,73 |
| 180 °C (Pred) | 60 | 61,66 | 3,37 | 5,46 | 54,38 | 66,63 |
| 200 °C (Pred) | 60 | 38,01 | 3,58 | 9,43 | 30,84 | 48,27 |
| REF °C (Po) | 60 | 61,93 | 10,03 | 16,19 | 35,81 | 81,49 |
| 180 °C (Po) | 60 | 60,63 | 10,72 | 17,69 | 36,79 | 81,72 |
| 200 °C (Po) | 60 | 48,96 | 10,46 | 21,37 | 22,46 | 69,51 |

Na grafe č. 5 môžeme vidieť taktiež logický rozdiel medzi svetlosťou referenčných vzoriek a vzoriek tepelne upravených, pre ktoré platí zásada, čím vyššia teplota pri úprave, tým vyššia tmavosť dreva. Tento rozdiel môžeme pozorovať najlepšie na obrázku č. (10)

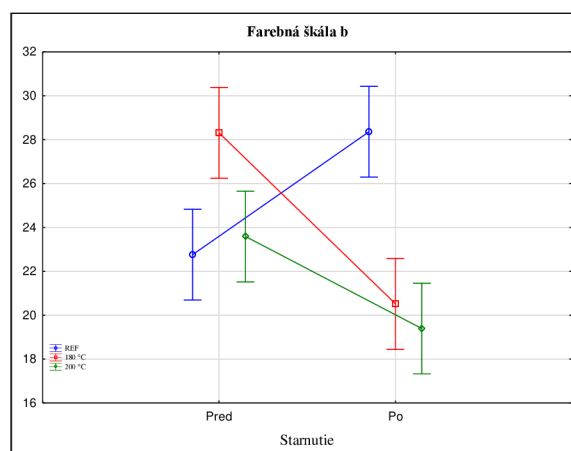
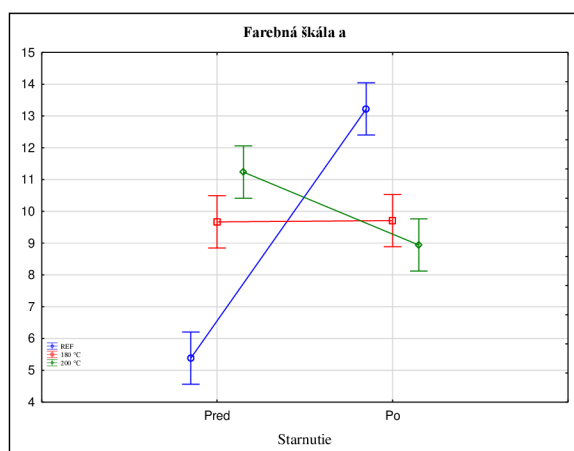


Graf č. 5. Grafické zobrazenie zmeny svetlosti pred a po starnutí

Z tabuľky 6 a grafov 6,7 vidíme, že výraznejšie zmeny vo farbe dreva nastali v prípade svetlých, referenčných vzoriek. Referenčné vzorky mali počas procesu starnutia vidíme výraznejšiu zmenu v ukazovateli a ktorý nám indikuje zmenu farby smerom k červenému spektru, ktoré má za následok zmenu farby do hnedastých odtieňov. Na druhej strane, pri tepelne upravených vzorkách vidíme výraznejšiu zmenu v ukazovateli b , ktorý má tendenciu približovať sa k nulovej hodnote reprezentujúcej šedú farbu.

Tabuľka č. 6. Výsledky farebných parametrov a,b

| | Počet meraní | Priemer | Smerodajná odchýlka | Variačný koeficient | Minimum | Maximum | |
|---|---------------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|-------|
| a | REF (Pred) | 60 | 5,39 | 1,40 | 26,06 | 3,61 | 9,50 |
| | 180 °C (Pred) | 60 | 9,67 | 0,91 | 9,36 | 8,09 | 12,73 |
| | 200 °C (Pred) | 60 | 11,24 | 0,99 | 8,83 | 9,61 | 15,50 |
| | REF °C (Po) | 60 | 13,22 | 4,76 | 35,99 | 3,76 | 23,67 |
| | 180 °C (Po) | 60 | 9,71 | 4,62 | 47,55 | 2,39 | 18,85 |
| | 200 °C (Po) | 60 | 8,94 | 3,88 | 43,36 | 1,39 | 16,47 |
| b | REF (Pred) | 60 | 22,76 | 8,81 | 38,69 | 18,46 | 81,80 |
| | 180 °C (Pred) | 60 | 28,31 | 8,32 | 29,38 | 24,70 | 90,84 |
| | 200 °C (Pred) | 60 | 23,59 | 2,69 | 11,39 | 16,42 | 28,52 |
| | REF °C (Po) | 60 | 28,36 | 10,50 | 37,01 | 7,81 | 43,66 |
| | 180 °C (Po) | 60 | 20,52 | 8,85 | 43,16 | 6,14 | 37,85 |
| | 200 °C (Po) | 60 | 19,39 | 7,45 | 38,42 | 3,88 | 31,47 |



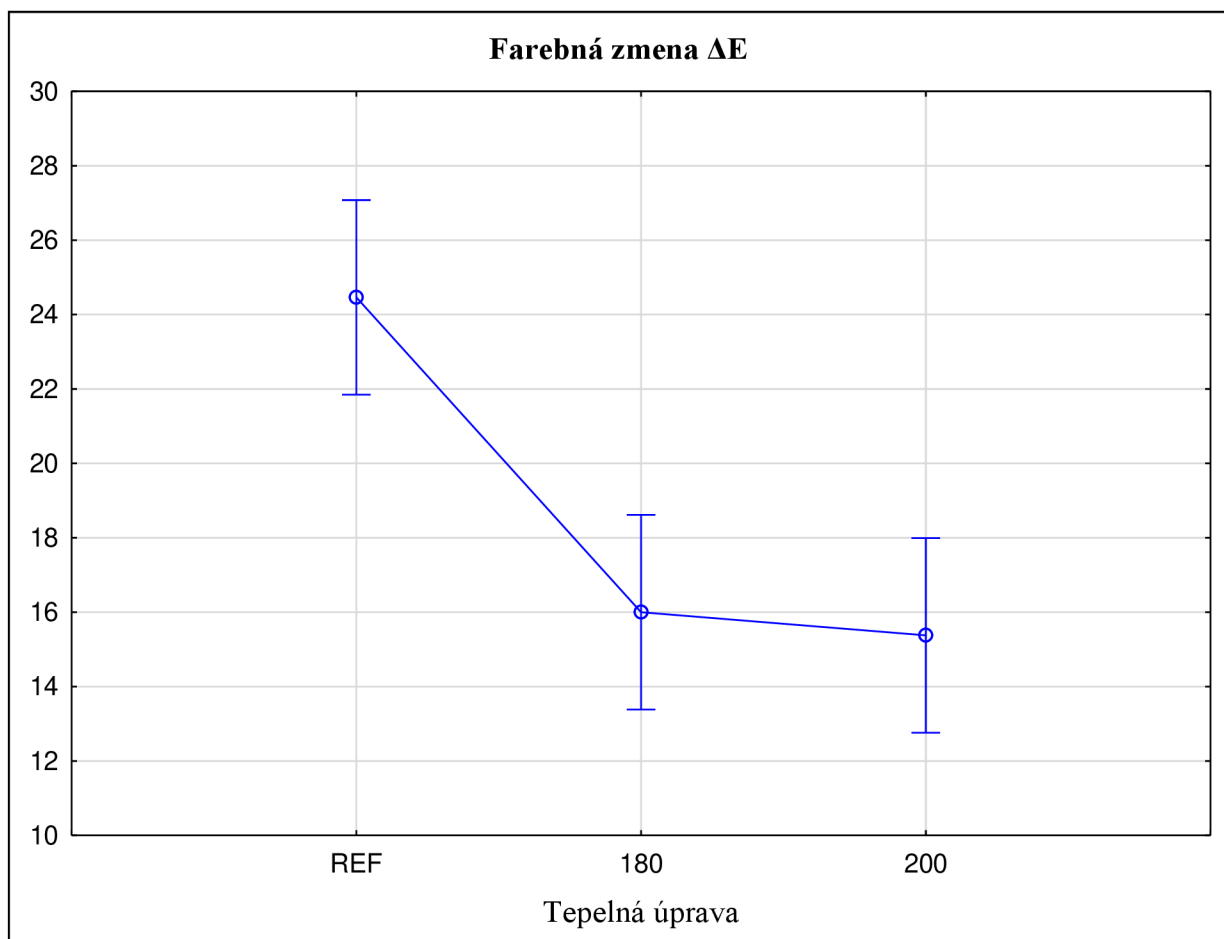
Grafy č. 6 a 7. Grafické zobrazenie zmeny farebných parametrov a,b pred a po starnutí

Všetky tieto čiastkové zmeny majú spoločný vplyv na ukazovateľ ΔE , ktorý nám charakterizuje celkovú farebnú zmenu vzoriek pred a po starnutí vypočítanú podľa vzorca (10).

Tabuľka č. 7. Výsledky celkovej farebnej zmeny ΔE

| | Počet meraní | Priemer | Smerodajná odchýlka | Variačný koeficient | Minimum | Maximum |
|--------|--------------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| REF | 12 | 24,46 | 6,86 | 28,03 | 12,22 | 34,96 |
| 180 °C | 12 | 16,00 | 4,00 | 25,01 | 11,26 | 26,76 |
| 200 °C | 12 | 15,38 | 4,76 | 30,97 | 6,96 | 24,30 |

Podľa predpokladov vidíme najväčší rozdiel u referenčných vzoriek, pri ktorých hodnota zmeny farby nadobúda hodnoty $\Delta E_{REF} = 24,46$. Podľa Zmeškala a kol (2002) táto hodnota už výrazne spadá do najvyššej kategórie zmeny farby označenej ako rušiaca.



Graf č. 8. Grafické zobrazenie zmeny farby pred a po starnutí

Vysoké hodnoty zmeny farby mohli byť spôsobené šikmým uložením vzoriek v UV-komore, čo malo za následok nerovnomerný vplyv predovšetkým vody, ktorá mala tendenciu stekať a teda pôsobiť dlhší čas na spodnú časť vzoriek, na ktorej boli viditeľne väčšie zmeny vo farbe, ako na vrchnej časti vzoriek. Pri tepelne upravených vzorkách bola celková farebná zmena významne nižšia, ako pri referenčných vzorkách, avšak stále výrazná. Konkrétne hodnoty $\Delta E_{180} = 16,00$ a $\Delta E_{200} = 15,38$ podľa Zmeškala a kol (2002) zaradujeme do kategórie zmeny veľmi výraznej.

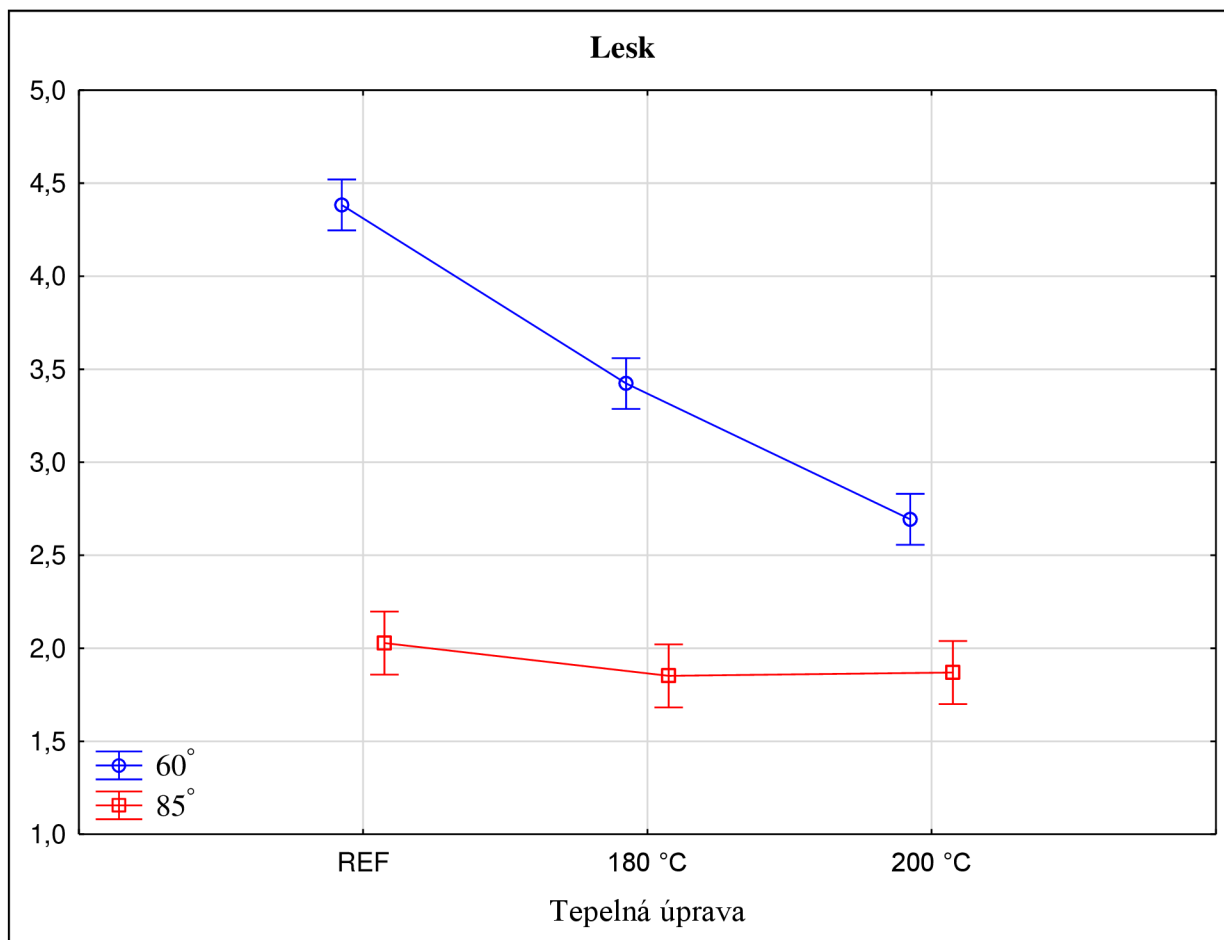
Lesk

V prípade lesku sa nám nepodarilo vyskúmať a porovnať zmenu lesku vzoriek v procese starnutia nakoľko po starnutí a aklimatizovaní vzoriek, kedy boli pripravené na druhé meranie lesku sme zistili poruchu v leskometri použitom pri prvom meraní a nepodarilo sa nám ho opraviť a ani zaobstarať náhradný leskometer v dostatočnom čase. Tabuľka č. 8 a graf č. 9 nám ukazujú hodnoty lesku pre jednotlivé tepelné úpravy pre uhly merania 60° a 85°.

Tabuľka č. 8. Výsledky lesku pred meraním (Gu)

| | | Počet meraní | Priemer | Smerodajná odchýlka | Variačný koeficient | Minimum | Maximum |
|--------|-----|--------------|---------|---------------------|---------------------|---------|---------|
| REF | 60° | 60 | 4,4 | 0,5 | 11,9 | 2,6 | 5,5 |
| | 85° | 60 | 2,0 | 0,7 | 35,2 | 1,0 | 3,9 |
| 180 °C | 60° | 60 | 3,4 | 0,5 | 13,8 | 2,4 | 4,4 |
| | 85° | 60 | 1,9 | 0,6 | 32,7 | 0,9 | 3,4 |
| 200 °C | 60° | 60 | 2,7 | 0,6 | 22,5 | 1,3 | 4,2 |
| | 85° | 60 | 1,9 | 0,7 | 35,9 | 0,8 | 3,5 |

Na týchto výsledok môžeme vidieť že pri meraní pod uhlom 85 ° nevidíme žiadnu štatisticky významnú zmenu medzi rôznymi úpravami vzoriek. Pri meraní pod uhlom 60 ° už vidíme, že podľa predpokladu sa nám najlesklejšie javia referenčné vzorky, pričom najmatnejšie sú vzorky upravované pri teplote 200 °C.



Graf č. 9. Grafické zobrazenie lesku rôznych tepelných úprav pred starnutím

Zhrnutie

Na záver ešte prikladáme v tabuľke č. 9 stručný súhrn všetkých skúmaných vlastností po priebehu starnutia pre referenčné vzorky, vzorky upravované pri 180 °C a pri 200 °C. Všetky zmeny sú uvádzané v percentuálnej zmene vzťahnutej k počiatku merania. Najväčšie percentuálne zmeny v tepelných charakteristikách vidíme podľa predpokladov u referenčných a tie najmenšie u vzoriek upravovaných pri 200 °C. Tento predpoklad bol založený na teoretických informáciách o thermowoode a jeho vplyve na vlastnosti dreva.

Tabuľka č. 9. Zmeny vlastností po starnutí (%)

| | REF | 180 °C | 200 °C |
|-------------------------------|---------|--------|--------|
| Hustota | -2,34 | +1,76 | +2,92 |
| Súčiniteľ tepelnej vodivosti | -7,62 | +3,79 | +1,19 |
| Súčiniteľ teplotnej vodivosti | 32,15 | +24,02 | +15,02 |
| Objemová tepelná kapacita | -28,00 | -14,51 | -9,71 |
| Svetlosť | -22,44 | -1,66 | +28,79 |
| Farba a | +145,47 | +0,41 | -20,40 |
| Farba b | +24,61 | -27,54 | -17,78 |

6. Záver

Výsledky experimentu nám napomáhajú v správnom vnímaní správania sa dreva počas jeho starnutia. Aj keď správanie tepelných vlastností dopadlo podľa predpokladu, podarilo sa nám v rámci našich meraní nájsť rozsah týchto zmien a taktiež sme určili štatistickú významnosť týchto zmien.

Už na prvý pohľad vidíme na grafických zobrazeniach viditeľné rozdiely vo vlastnostiach troch rôznych vzoriek dreva, ktoré boli pre náš experiment použité ako počiatkové vzorky, na ktorých sme následne sledovali zmeny v priebehu starnutia. Z našich meraní vidíme zreteľnú koreláciu tepelnej konduktivity na hustote dreva, pre všetky 3 skupiny vzoriek, pričom samotná hustota mala rozdielny priebeh, kedy u referenčných vzoriek klesala, no pri thermowoode sa nijak štatisticky významne nemenila. V prípade tepelnej difuzivity a objemovej tepelnej kapacity sme podľa predpokladov namerali a vypočítali viditeľnú negatívnu koreláciu, ktorú udáva aj literatúra. Zásadnejším zistením pre náš experiment sú však percentuálne rozdiely v týchto parametroch v procese starnutia, kedy pri referenčných vzorkách vzrástla difuzivita o vyše 32 %, pri thermowoode upravovanom pri 180 °C vzrástla difuzivita o 24 % a pri thermowoode upravovanom pri 200 °C vzrástla len o 15 %. Podobným správaním sa teda menila aj objemová tepelná kapacita, kedy u referenčných vzoriek klesla o 28 %, pri thermowoode (180 °C) klesla o takmer 15 % a pri thermowoode (200 °C) len o necelých 10 %, čo nám dáva pozitívne výsledky pre ďalšie použitie thermowoodu napríklad pri drevostavbách, ktoré sú veľmi závislé práve o tepelných a tepelnoizolačných vlastnostiach dreva a predovšetkým od ich zmien v priebehu času. Čo sa týka celkovej farebnej zmeny, tá

je podľa predpokladov najviac badateľná u referenčných vzoriek, pri thermowood je výrazne nižšia, no stále veľmi výrazná. Zmena farby má však len estetickú hodnotu, ktorú možno odstrániť pomocou povrchovej úpravy, no v dnešnej dobe už začína byť moderný aj sivastý vzhľad dreva typický práve pre staré drevo.

Prínos pre vedu

Z nameraných dát a vypočítaných výsledkov môžeme na záver usúdiť, že tento experiment splnil svoj účel, nakoľko sme overili predpokladané správanie sa dreva jedle obrovskej pri procese jeho starnutia, no na druhej strane nám to otvára d'alsie otázky, ktoré by bolo zaujímavé zodpovedať prostredníctvom d'alsích experimentom a skúmaní. Jedná sa predovšetkým o vplyv času na jednotlivé tepelné charakteristiky termicky upraveného dreva jedle obrovskej, pričom by bolo zaujímavé zistiť zlomový bod v čase, po ktorý by boli zmeny skúmaných tepelných charakteristik štatisticky významné, nakoľko predpokladáme, že najväčšie zmeny nastávajú práve na začiatku experimentu.

Prínos pre prax

Výsledky nám jasne ukazujú obrovský pozitívny vplyv tepelnej úpravy dreva pomocou technológie thermowood na množstvo jeho vlastností, čím ho predurčujú predovšetkým pre použitie v exteriéry, v ktorom jeho vlastnosti ešte viac vyniknú. Tento experiment nám však potvrdil aj výhodu thermowoodu v procese starnutia, nakoľko je z výsledkov zrejmé jeho neporovnateľne vyššia stabilita voči referenčným vzorkám čo sa týka tepelných vlastností, čo je v praktickom využití dreva veľmi vyhľadávanou kvalitou.

7. Zoznam použitej literatúry

1. Bárta, J. Porovnání barvy, smáčení, drsnosti a tvrdosti neupraveného a termicky upraveného dřeva jedle obrovské, 2021, Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedúci práce: Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.
2. Bottomley, J.T. On the thermal conductivity of water. Proc. R. Soc. A Philosophical Trans. 1881, 172, 537–545.
3. Chang, H.T. Chang, S.T. 2002: Moisture excluding efficiency and dimensional stability of wood improved by acylation, *Bioresource Technol.* 85, 201- 204
4. Čiháková, V. Vliv řezání laserovým paprskem na změnu barvy a lesku řezaných ploch, 2019, Diplomová práce, Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedúci práce: Ing. Miroslav Sedlecký, Ph.D.
5. ČSN EN ISO 2813 (673066) Nátěrové hmoty - Stanovení lesku nátěru při úhlu 20°, 60° a 85°. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 2016. 24s.
6. Fabiyi J.S, McDonald A.G. Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites, 2010, Department of Forest Products, University of Idaho, USA
7. Foiles, M.W.; Graham, R.T.; Olson, D.F. Grand Fir. In Burns, R.M; Honkala, B.H. (tech. coords.). *Silvics of North America : Volume 1. Conifers.* 1. vyd. Washington D.C. : Forest Service, United States Department of Agriculture, 1990.
8. Fulín, M. Pěstování, produkční potenciál a ekologické důsledky pěstování jedle obrovské (*Abies grandis* /Douglas ex D. Don/ Lindl.) v České republice, 2015, Česká zemědělská univerzita v Praze.

9. Gandelová, L; Horáček, P; Šlezingerová, J. Nauka o dřevě. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. str. 176 s. Sv. Vyd. 3. ISBN 978-80-7375-312-2.
10. Gérard, J; Goncalez, J; Ananías, R; Charrier, B; sa Silva, G.F; Dilem, A. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the CIELab system. Universidad del Bío-Bío. 2012. Concepción, Chile
11. Hofman, J. Pěstování jedle obrovské. 1. vyd. Praha, 1963 : Státní zemědělské nakladatelství,
12. Hill, C. Wood Modification Chemical, Thermal and Other Processes. 2006 Chichester : JohnWiley & Sons, Ltd., ISBN: 0-470-02172-1.
13. Ho, C.Y.; Powell, R.W.; Liley, P.E. Thermal conductivity of the elements, 2009, Journal of Physical and Chemical Reference Data 1, 279
14. Hongli, F. Weihu, W. Edge detection of color road image based on Lab model, 2013, International Conference on Computational and Information Sciences, Shiyang, China
15. Horák, P. Porovnání hustotního profilu dřeva jedle bělokoré a jedle obrovské. Praha, 2020. Bakalářská práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedoucí práce Ing. Vlastimil Borůvka, PhD
16. Hunt, R.S. *Abies grandis* (Douglas ex D. Don in Lambert) Lindley [family PINACEAE], 2002, USA Calif. USA, Idaho USA, Mont. USA, Oreg. USA, Wash. Canada B.C
17. Levy, J.F. The natural history of the degradation of wood, Philosophical Transactions of the Royal Society, 1987, London

18. Lukášek, J. Posouzení variability vybraných vlastností dřeva jedle obrovské (*Abies grandis* (Douglas) Lindl.) z oblasti Černokostelecka. Praha, 2012
19. Mishra, R.; Militky, J. Nanoporous materials, 2019, Nanotechnology in Textiles, Theory and Application, ISBN 978-0-08-102609-0
20. Musil, I.; Hamerník, J. Jehličnaté dřeviny : Lesnická dendrologie 1. 1. vyd. Praha : Academia, 2007. 352 s. ISBN 978-80-200-1567-9.
21. Niemz, P., Sonderegger, W.: Untersuchungen zur Korrelation ausgewählter Holzeigenschaften untereinander mit der Rohdichte unter Verwendung von 103 Holzarten. Schweiz Z. Forstwes., 2003
22. Požgaj, A; Chovanec, D; Kurjatko, S; Babiak, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vyd. Bratislava: Príroda, 1997. 488 s. ISBN 80-07-00600-1.
23. Radkau J. Wood a history. In Germany as Holz oekom verlag, 2007
24. Reinprecht a kol. Termodrevo - príprava, vlastnosti a aplikácie. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2008. str. 89 s. Sv. 1. vydání. ISBN 978-80-228-1920-6.
25. Suleiman, B.M. a kol. Thermal conductivity and diffusivity of wood, 1999, Wood Science and Technology 33 (1999) 465±473 Ó Springer-Verlag
26. Šika, A. Introdukce jedle obrovské v ČSR. Zprávy lesnického výzkumu. 1983, vol. 28, no. 1, s. 1-3. ISSN 0322-9688.
27. Tomec, J. Vyhodnocení provenienční výzkumné plochy s jedlí obrovskou na lokalitě Drahenice v jižních Čechách. 2018, Bakalárska práca, Česká zemědělská univerzita v Praze. Vedúci práce: prof. Ing. Vilém Podrázský, CSc.

28. Větvička, V. Stromy a keře. 2. vyd. Praha : Aventinum, 2005. 288 s. ISBN 80- 7151-254-0.
29. Wagenführ R., Scheiber Ch. Holzatlas. Leipzig, Fachbuchverlag, 1974: 690 s. ISBN 10: 3343004596
30. Zeidler, A; Gryc, V; Vavrčík, H; Luk83ek, J. Dřevo jedle obrovské. časopis vydávaný ČS. maticí a věnovaný lesnické vědě a praxi. Čs. matice lesnická, prosinec 2010, Sv. 89, 12.
31. Zmeškal, O. Čeppan, M. Dzik, P. Barevné prostory a správa barev. Brno, 2002

* * *

ThermoWood Association. International ThermoWood Association statistics 2019, [Online] 2019. [Citácia:1.2..2022]. Dostupné z :
<https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/uutiset/Productionstatistics2019.pdf>

Thermowood Handbook. 2003. [Online] 2003. [Citácia: 5.2.2022]. Dostupné z :
<https://www.thermowood.fi/esitteet-ja-kirjat>