

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Termická modifikace dřeva

Bakalářská práce

Autor: Adam Slobodzian

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

2021

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Adam Slobodzian

Dřevařství
Dřevařství

Název práce

Termická modifikace dřeva

Název anglicky

Thermal modification of wood

Cíle práce

Hlavním cílem práce je analýza současných a inovativních technologií výroby termicky modifikovaného dřeva s důrazem na různé fyzikální a mechanické vlastnosti během jeho používání.

Metodika

1. Teoretický rozbor současných technologií termické modifikace dřeva a porovnání výsledných produktů. Teoretický rozbor inovativních technologií termické modifikace dřeva s využitím inertního prostředí nebo vakua.
2. Porovnání termické modifikace dřeva s ostatními modifikacemi dřeva (např. chemickou nebo impregnační polymer) z pohledu odolnosti a trvanlivosti výsledných produktů v exteriéru.

Doporučený rozsah práce

40 – 50

Klíčová slova

dřevo, termická modifikace, chemické změny, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti

Doporučené zdroje informací

- BUBENÍKOVÁ, T., KAČIKOVÁ, D., KAČIK, F. Charakteristiky ligninů při termické degradaci smrekového dřeva. 1. vydání, Zvolen: Technická univerzita, Vedecké štúdie, 2007, 70 s. ISBN 978-80-228-1728-8
- HILL, C. A. S. Wood modification: chemical, thermal and other processes. Chichester: John Wiley & Sons, 2006, 249 s. ISBN 0-470-02172-1.
- KAČIKOVÁ, D., KAČIK, F. Chemické a mechanické změny dřeva při termické úpravě. 1. vydání, Zvolen: Technická univerzita, 2011, 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7
- REINPRECHT, L., VIDHOLDOVÁ Z. Termodřevo – příprava, vlastnosti a aplikace. Zvolen: Technická univerzita, 2008, 89 s. ISBN 978-80-228-1920-6
- REINPRECHT, L. Wood deterioration, protection, and maintenance. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2016, 340 s. ISBN 978-1-119-10653-1.

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 27. 2. 2020

Ing. Radek Rinn

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 3. 3. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 11. 09. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Termická modifikace dřeva vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Miroslava Gašparíka, PhD., použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne.....

.....

Podpis autora

Poděkování

Chtěl bych upřímně poděkovat každému, kdo mi poskytl radu, pomoc nebo podporu při psaní této práce. Největší vděk patří vedoucímu práce, panu Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. za neocenitelné a odborné připomínky k práci. Nesmím zapomenout na prof. RNDr. Františka Kačíka, Ph.D., který mi byl rovněž velmi nápomocen a poskytnul mi mnoho cenných podkladů a informací.

Abstrakt

Cílem bakalářské práce je analýza termické modifikace dřeva s důrazem na jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. První část shrnuje informace o nejpoužívanějších současných průmyslových technologiích (ThermoWood[®], PLATO, OHT, Rétification, Le Bois Perdure). Z těchto technologií je nejpoužívanější ThermoWood[®], protože je cenově nejdostupnější a její produkty mají široké spektrum použití. V rámci této části jsou uvedeny i nenovější inovativní technologie oblasti termických modifikací (Termovuoto, WTT, FirmoLin, modifikace parafinem). Nejperspektivněji se z nich jeví Termovuoto právě díky vlastnostem výrobků podobných ThermoWoodu[®]. V další části se nachází stručný rozbor ostatních, netermických modifikací dřeva (acetylace, furfurylace, impregnace živicemi, mechanicky zhuštěné dřevo). Následuje porovnání těchto modifikací s modifikací termickou a s konečným celkovým zhodnocením. Porovnání se zaměřuje na odolnost a trvanlivost konečných produktů při použití v exteriérových aplikacích. Na základě porovnání bylo zjištěno, že netermické modifikace nezhoršují tolik mechanické vlastnosti dřeva, jako termické modifikace. Z tohoto důvodu se acetylace, jako jedna z nejpoužívanějších netermických modifikací, může používat pro nosné konstrukce namísto termicky modifikovaného dřeva. Pořizovací náklady jsou ale citelně vyšší. Mechanicky modifikované dřevo vykazuje mnohem lepší mechanické vlastnosti než dřevo termicky modifikované, má však omezenější použití pro interiérové výrobky.

Klíčová slova: termická modifikace, dřevo, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti, modifikace dřeva, chemické změny

Abstract

The aim of the bachelor thesis is the analysis of thermal modification of wood with emphasis on its physical and mechanical properties. The first part summarizes information about the most used current industrial technologies (ThermoWood[®], PLATO, OHT, Rétification, Le Bois Perdure). Of these technologies, ThermoWood[®] is the most used because it is the most affordable and its products have a wide range of applications. Within this part, the latest innovative technologies in the field of thermal modifications (Termovuoto, WTT, FirmoLin, paraffin modification) are also presented. Termovuoto seems to be the most promising of these thanks to the properties of products similar to ThermoWood[®]. In the next part there is a brief analysis of other, non-thermal modifications of wood (acetylation, furfurylation, impregnation with resins, mechanically compacted wood). The following is a comparison of these modifications with the thermal modification and with the final overall evaluation. The comparison focuses on the resistance and durability of the final products when used in outdoor applications. Based on the comparison, it was found that non-thermal modifications do not worsen as much the mechanical properties of wood as thermal modifications. For this reason, acetylation, as one of the most widely used non-thermal modifications, can be used for load-bearing structures instead of thermally modified wood. However, acquisition costs are significantly higher. Mechanically modified wood has much better mechanical properties than thermally modified wood, but has more limited use for interior products.

Keywords: thermal modification, wood, mechanical properties, physical properties, wood modification, chemical changes

Obsah

1	Úvod	12
2	Cíle práce	13
3	Termická modifikace.....	14
3.1	Chemické změny v termicky modifikovaném dřevě	14
3.1.1	Hemicelulózy	16
3.1.2	Celulóza.....	16
3.1.3	Lignin	17
3.1.4	Extraktivní látky	17
3.2	Mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva	18
3.3	Fyzikální vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.....	18
3.3.1	Hygroskopicitá	18
3.3.2	Hustota	19
3.3.3	Barva	20
3.3.4	Biologická odolnost.....	21
3.4	Zpracování termicky modifikovaného dřeva	22
4	Současné průmyslové technologie termické modifikace	24
4.1	PLATO.....	24
4.2	OHT	27
4.3	Rétification, Le Bois Perdure.....	29
4.4	ThermoWood	30
5	Porovnání současných technologií termické modifikace	34
6	Inovativní technologie termické modifikace	37
6.1	Termovuoto.....	37
6.2	FirmoLin	38
6.3	WTT.....	38
6.4	Modifikace parafínem	39
7	Netermické modifikace dřeva.....	41
7.1	Chemická modifikace	41
7.1.1	Acetylace	41
7.1.2	Furfurylované dřevo	42
7.1.3	Impregnace vinylovými monomery	44

7.1.4	Impregnace fenol-formaldehydovými živicemi	44
7.1.4.1	Impreg	45
7.1.4.2	Compreg	46
7.2	Mechanická modifikace	47
7.1.2	Zhušťované dřevo pro studené ohýbání	49
8	Srovnání termické modifikace s ostatními modifikacemi dřeva	50
9	Závěr	53
10	Seznam použitých zdrojů	54

Seznam obrázků

Obrázek 1: Impakt hlavních dřevních složek důsledkem termické modifikace na vlastnosti dřeva.....	15
Obrázek 2 : Postupně zvyšující se vliv teploty na barvu dřeva, jedle.....	20
Obrázek 3: Změny barvy dřeva procesem ThermoWood [®] , borovice.....	20
Obrázek 4: Dřevo vytažené z autoklávu	25
Obrázek 5: Geversduit Tree House, smrk, Castricum.....	26
Obrázek 6: Plážové domky, smrk, Nieuwvliet-Bad.....	26
Obrázek 7: Zastřešení plaveckého bazénu, fraké, Buckinghamshire.....	27
Obrázek 8: Modul pružnosti dřeva vyrobeným PLATO procesem ve srovnání s nemodifikovaným dřevem	27
Obrázek 9: Autokláv společnosti Qijuk pro proces OHT	28
Obrázek 10: Výrobky vyrobené OHT procesem	29
Obrázek 11: Sauna z produktu Thermo-S.....	32
Obrázek 12: Produkt Thermo-D, borovice	33
Obrázek 13: Vliv termické modifikace ThermoWood [®] na modul pružnosti v ohybu.....	35
Obrázek 14: Vliv termické modifikace ThermoWood [®] na ohybovou pevnost.....	35
Obrázek 15: Porovnání ohybové pevnosti dřeva modifikovaného PLATO procesem a nemodifikovaného dřeva.....	36
Obrázek 16: Termo-vakuová komora	37
Obrázek 17: Muzeum Castellum Hoge Woerd, Utrecht	38
Obrázek 18: Autokláv společnosti WTT	39
Obrázek 19: Nemodifikované dřevo, obalení buněčných stěn parafínem	40
Obrázek 20: Most pod hladinou příkopu, Halsteren	42
Obrázek 21: Mostová konstrukce, Sneek.....	42
Obrázek 22: Produkt Lignia [®] Yacht na palubě lodi.....	45
Obrázek 23: Materiál Impreg	46
Obrázek 24: Různé použití compregu v praxi.....	47
Obrázek 25: Šablony z materiálu Lignofol [®]	47
Obrázek 26: Stav před modifikací, deformované buněčné stěny.....	48
Obrázek 27: Lavička z produktu Cold-Bend Hardwood [™]	49

Seznam tabulek

Tabulka 1: Obsah dřevních složek termicky modifikovaného a nemodifikovaného dřeva.....	15
Tabulka 2: Klasifikace trvanlivosti proti dřevokazným houbám.....	21
Tabulka 3: Třídy ohrožení dřeva.....	22
Tabulka 4: Teploty modifikace pro třídy technologie ThermoWood	31
Tabulka 5: Souhrn účinků procesu ThermoWood na vlastnosti dřeva podle třídy	32
Tabulka 6: Srovnání podmínek komerčně používaných termických modifikací .	34
Tabulka 7: Srovnání vybraných aspektů chemické modifikace dřeva s termickou modifikací	51

1 Úvod

Dřevo je přírodní obnovitelný materiál, který se dnes těší čím dál větší oblibě. Jako každý materiál má však dřevo díky svým vlastnostem omezené možnosti použití, a to zejména při použití v exteriéru. Dřevo jako takový materiál má obdobně jako jiné, podobné materiály, ať obnovitelné či neobnovitelné, řadu nevýhod. Počínaje rozměrovou nestabilitou, mechanickými vlastnostmi, změnami vystavením atmosféře, odolností vůči působení biologických činitelů nebo pro někoho estetickými vlastnostmi konče. Abychom dosáhli zlepšení co největšího počtu jeho výše uvedených vlastností, provádíme tzv. modifikace dřeva. V dnešní době existuje široké spektrum různých modifikací dřeva, každá je založena na jiném principu. Bakalářská práce se věnuje podrobněji modifikaci termické.

Termická modifikace (úprava) dřeva není žádnou novinkou, už dávno lidé věděli, že vystavením povrchu dřeva otevřenému ohni zlepší jeho přirozenou odolnost a trvanlivost při použití ve venkovním prostředí. Termicky modifikované dřevo zažilo větší, masovější rozmach až v 21. století, kdy lidé zažívají zatím největší a stále se posouvající technologickou etapu plnou nejrůznějších inovací a objevů nejenom v dřevařském průmyslu.

Termicky modifikované dřevo se oproti nemodifikovanému vyznačuje změnou složení základních chemických dřevních komponentů. Od těchto změn se následně odvíjí všechny vlastnosti modifikovaného dřeva.

Existuje mnoho druhů termické modifikace dřeva, o některých se dá hovořit jako o již zaběhlých, jiné prochází ještě fázemi testování nebo jsou na trhu pouze krátkou dobu a větší rozšíření je teprve čeká. Takové technologie mohou následně posloužit, jako alternativa k právě již zaběhlým technologiím.

Protože termická modifikace dřeva má také své nevýhody, existují další způsoby modifikace dřeva, u kterých se o těchto slabých stránkách dá hovořit jako o přednostech a naopak. Vše se vyvíjí dle konkrétních požadavků zákazníka na použití dřeva.

Dřevu jako obnovitelnému materiálu se bude v následujících letech dostávat čím dál větší pozornosti, vývoje termických modifikací nevyjímaje. Jde o velmi perspektivní oblast zpracování dřeva.

2 Cíle práce

Práce se klade za cíl analyzovat přední současné technologie výroby termicky modifikovaného dřeva společně s nejnovějšími inovativními technologiemi, a to s důrazem na jeho mechanické a fyzikální vlastnosti během jeho používání. Analýza probíhá čistě na teoretické bázi. První část práce si klade za úkol rozbor následujících bodů:

- všeobecná charakteristika termické modifikace dřeva,
- současné technologie termické modifikace,
- inovativní způsoby termické modifikace.

Druhá část práce cílí na rozbor ostatních, netermických modifikací dřeva z hlediska odolnosti a trvanlivosti. Je kladen důraz na to, aby se výsledné modifikované výrobky nacházely v exteriéru. Druhá část práce si stanovila za úkol stručný teoretický rozbor:

- netermických metod modifikace dřeva,
- porovnání produktů netermických modifikací dřeva s produkty termické modifikace dřeva.

3 Termická modifikace

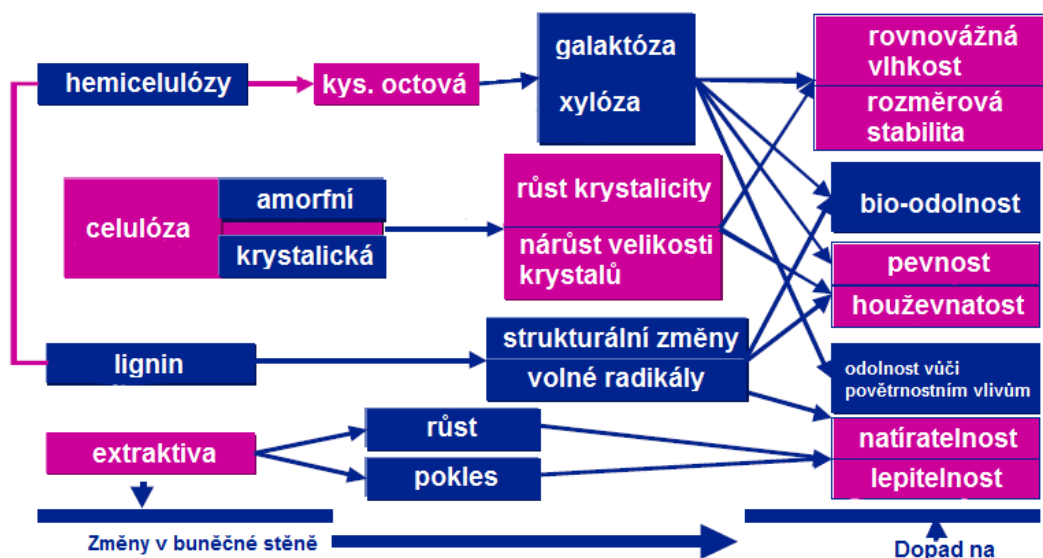
Termická modifikace je technologický proces, při kterém je dřevo vystaveno teplotám pohybujícím se mezi 180 až 280 °C při přesně stanovených podmínkách (Reinprecht, 2008). Při užití teplot nad 300 °C dřevo degraduje příliš mnoho, zatímco při užití teplot příliš nízkých tj. menších než 140 °C, pozorujeme strukturální změny pouze nepatrně. Dřevní struktura se díky modifikaci mění z důvodu rozkladu hemicelulózy, krystalizací celulózy a štěpení ligninu (Hill, 2006).

Dřevo změněné termickou modifikací se vyznačuje sníženou mezí hygroskopicity, podstatně vylepšenou odolností vůči biotickým činitelům (bioodolnost) jako dřevo zbarvujícím a dřevokazným houbám nebo napadení dřevokazným hmyzem, lepší rozměrovou stabilitou (redukci bobtnání a sesychání) či odolností proti oděru, ale i sklonem k vzniku prasklin či změnou barvy. Obecně se termicky modifikované dřevo charakterizuje sníženými mechanickými vlastnostmi. Je také křehčí. Z tohoto důvodu se nesmí takto modifikované dřevo se sníženými mechanickými vlastnostmi používat na konstrukční nosné prvky. Skrze termickou modifikaci mohou najít více uplatnění i dřeviny běžně komerčně méně využívané. Termicky modifikované dřevo se vyrábí a vyvíjí především v zemích jižní a západní Evropy. Podstatnou část výroby tvoří i státy Skandinávie nebo Severní Ameriky.

V současné době existuje více způsobů termické modifikace, každá metoda má odlišný průběh a výsledný produkt závisí na několika proměnných, jimž je dřevo vystaveno během procesu modifikace. Jde o teplotu, čas, prostředí, druh dřeviny nebo vstupní vlhkost. Termicky modifikované dřevo nachází v neposlední řadě použití v mnoha aplikacích včetně obkladů, oken, parket, podlah teras nebo interiérů saun a koupelen.

3.1 Chemické změny v termicky modifikovaném dřevě

K pochopení mnoha vlastností v termicky modifikovaném dřevě, které se týkají fyzikálního nebo mechanického charakteru je vyžadovaná dobrá znalost změn základních stavebních chemických prvků (Obr. 1).



Obrázek 1: Impakt hlavních dřevních složek důsledkem termické modifikace na vlastnosti dřeva (International Thermowood Association, 2003)

Obecně lze konstatovat, že hlavní složky dřeva (hemicelulózy, celulóza, lignin) reagují za tepla rozdílně, celulóza spolu s ligninem degradují pomaleji a za vyšších teplot než hemicelulózy (Tab. 1). Extraktivní látky degradují snáze a dojde při termické modifikaci k jejich vypaření (International Thermowood Association, 2003). V důsledku termického zpracování dochází k odstranění vody ze dřeva, dřevo dehydratuje, tepelně oxiduje a dochází k depolymerizaci a degradaci dřevních složek (Kučerová a kol., 2016).

Tabulka 1: Obsah dřevních složek termicky modifikovaného a nemodifikovaného dřeva (Gašparík a kol., 2019)

Dřevina	Teplota prostředí	Celulóza [%]	Hemicelulózy [%]	Lignin [%]
Teak	nemodifikovaná	36,9	26	35,4
	160 °C	39,4	16,6	39,3
	180 °C	40,2	15	39,5
	210 °C	41,4	8,4	40,5
Meranti	nemodifikovaná	53	18,5	32,4
	160 °C	51	15,5	36,7
	180 °C	52	14,1	36,3
	210 °C	59,1	3,6	35,3

3.1.1 Hemicelulózy

Hemicelulózy spolu s celulózou patří k sacharidům, jejich obsah ve dřevní hmotě je přibližně 25 – 35%. Hemicelulózy tvoří kratší řetězce spojené rozličnými monosacharidy. Složení a obsah hemicelulóz se liší u každé dřeviny (International Thermowood Association, 2003). Hemicelulózy jsou tepelně nejreaktivnější složkou v buněčné stěně, degradují ze všech prvků stavby dřeva nejdříve, a to už při nižších teplotách od 160 °C. Jejich degradace je považována za hlavní faktor zapříčínující pokles mechanických vlastností (Boonstra a kol., 2007). Degradace hemicelulóz začíná deacetylací, při zahřívání dřeva vzniká z acetylovaných hemicelulóz hydrolyzou kyselina octová $C_2H_4O_2$. Ta rozkládá vazby spojující jednotky glukózy a rozkládá celulózu na kratší části (International Thermowood Association, 2003). Při vysokých teplotách dochází také k částečné degradaci ligninu, přičemž vzniká voda, oxid uhličitý CO_2 a kyselina mravenčí CH_2O_2 . Takové látky poté spolu s úbytkem hemicelulóz v modifikovaném dřevu přispívají k jeho hydrofobnosti a bio-odolnosti (Reinprecht, 2008).

Teplota degradace hemicelulóz se pohybuje mezi 200 – 260 °C. Degradace hemicelulóz vzrůstá se zvyšující se teplotou a dobou ohřevu a projevuje se zvýšeným stupněm krystalizace dřevní hmoty, produkci kyseliny octové a methanolu CH_4O . Kyselina octová se podílí na degradaci polysacharidů a k její produkci dochází v důsledku přítomnosti acetylových skupin CH_3CO- . Obecně jsou listnáče méně odolné vůči degradaci díky vyššímu podílu právě hemicelulóz s větším obsahem acetylových skupin v porovnání s jehličnany (Hill, 2006). Degradace hemicelulóz (sacharid) je mimo jiné důvodem odolnosti vůči dřevokazným houbám, představují totiž výživné látky pro houby (International Thermowood Association, 2003).

3.1.2 Celulóza

Celulóza spolu s hemicelulózami patří k sacharidům, její obsah ve dřevní hmotě je přibližně 40 – 50%. Tvoří dlouhé řetězce složené z jednotek glukózy, které jsou spojeny vazbami mezi hydroxylovými skupinami. Je poněkud stabilnějším elementem než hemicelulózy. Spolu s degradací hemicelulózy je degradace celulózy pokládána za jednu z příčin, kvůli které je termicky

modifikované dřevo odolnější proti biotickým činitelům. Při teplotách pod 300 °C resp. už kolem 230 °C stupeň polymerizace klesá, tvoří se volné radikály, vznikají karbonylové a hydroxylové skupiny a oxid uhličitý CO₂ stejně jako oxid uhelnatý CO. K její degradaci dochází mnohem pomaleji než u hemicelulóz a její krystaly resp. krystalinita je zvyšována důsledkem degradace její amorfni části, právě její amorfni část degraduje nejdříve (International Thermowood Association, 2003; Hill, 2006). Ve všeobecnosti lze konstatovat, že se stupeň polymerace snižuje, tak množství krystalické celulózy se naopak zvyšuje (Tab. 1) (Kubš, 2019).

3.1.3 Lignin

Úlohou ligninu je držení buněk dřeva pohromadě. Jeho podíl v dřevní hmotě činí 25 – 30% u jehličnanů a 20 – 25% u listnáčů. Lignin se skládá z fenolpropanových jednotek spojených ether – uhlíkovými vazbami (International Thermowood Association, 2003). Z tří hlavních dřevních komponentů lignin nejlépe odolávat termické modifikaci. V důsledku toho se obsah ligninu ve dřevě zvyšuje zahříváním. K degradaci ligninu dochází pouze při překročení hranice 200°C (Hill, 2006). Nezhuštěné jednotky ligninu jsou přeměněny do jednotek difenylmethanu C₁₃H₁₂. Tento proces významně působí na vlastnosti ligninu během termické modifikace jako je barva, reaktivita či schopnost rozpuštění (Čermák, 2013). Obsah ligninu v termicky modifikovaném dřevu pozvolna vzrůstá účinkem degradací hemicelulóz a amorfni části celulózy (Kubš, 2019).

3.1.4 Extraktivní látky

Extraktivní látky tvoří méně než 5% dřevní hmoty. Skupina extraktivních látek zahrnuje například terpeny, tuky, cukry, fenoly a vosky. Neřadí se mezi konstrukční složky dřeva, v důsledku termické modifikace valná většina extraktivních látek mizí – odpaří se či degraduje (International Thermowood Association, 2003). Jejich přesun na povrch během tepelného zpracování vede často k tvorbě nevzhledných pryskyřičných skvrn, které se poté mechanicky

odstraní. Ztráta těkavých extraktivních látek se projevuje při vzniku měřitelných emisí VOC - těkavých organických látek (Hill, 2006).

3.2 Mechanické vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

Hlavní nevýhodou termicky modifikovaného dřeva je znatelný úbytek mechanických vlastností. To má za následek především nevhodnost používání takto modifikovaného dřeva pro konstrukce nosných ploch. Je tedy důležité, aby proces termické modifikace zlepšující bio-odolnost či rozměrovou stabilitu měl za následek pokud možno, co nejmenší ztrátu mechanických vlastností (Hill, 2006). Za hlavním faktor zhoršující mechanické vlastnosti je pokládána degradace hemicelulóz, menší roli hraje krystalizace amorfni celulózy a změny ve struktuře ligninu (Čermák, 2013). Výsledné mechanické vlastnosti modifikovaného dřeva silně závisí na použité teplotě, délce jejího působení, dále na technologii nebo dřevině. Vesměs lze konstatovat, že pevnost a houževnatost se snižují v rámci rostoucí teploty. Listnáče obecně vykazují vyšší pevnostní ztráty než jehličnany při termické modifikaci za stejných podmínek (Hill, 2006).

Během termické modifikace se nejprve modul pružnosti v ohybu (MOE) krátce mírně zvýší, za vyšších teplot dochází k jeho snížení. Dvěma nejvíce ovlivněnými mechanickými vlastnostmi termicky modifikovaného dřeva je maximální pevnost v ohybu (MOR) a rázová houževnatost. Maximální pevnost v ohybu se u jehličnatých dřevin při teplotách do 180 °C výrazněji nemění, nad 200 °C se pokles pevnosti už snižuje znatelně. Rázová houževnatost za nižších teplot kolem 180 °C může klesnout o víc jak 30 % (Kanát, 2020).

Díky ztrátě amorfni polysacharidů se dřevo se stává také křehčím (Čermák, 2013). Jeho tuhost, tvrdost a tlaková pevnost zůstávají často beze změny či se mírně zvyšují (Reinprecht, 2008).

3.3 Fyzikální vlastnosti termicky modifikovaného dřeva

3.3.1 Hygroskopicitá

Jednou z nejvíce důležitých vlastností termicky modifikovaného dřeva je hygroskopicitá, od které se odvíjí mnoho jeho dalších vlastností, jako rozměrová

stabilita (s ní spojené bobtnání a sesychání) či bio-odolnost. Vyjadřuje schopnost dřevní hmoty přijímat a navracet vodu do okolního prostředí. Hygroskopicita termicky modifikovaného dřeva je podstatně menší než u nemodifikovaného dřeva. Děje se tak díky degradaci hemicelulóz, většímu podílu krystalické celulózy a odebráním funkčních hydrofobních OH skupin (Kubš, 2019; Kanát, 2020). Hygroskopicitu reprezentuje rovnovážná vlhkost. Termicky modifikované dřevo má tuto schopnost nižší než dřevo nemodifikované. Relativní vlhkost nemodifikovaného dřeva v interiéru při pokojové teplotě se pohybuje kolem 12 %, například dřevo modifikované metodami Rétification nebo ThermoWood® má relativní vlhkost kolem 3 – 5 %. Obecně je vhodné používat termicky modifikované dřevo v místech s co nejmenší vlhkostí (Reinprecht, 2008). Lignin pojí k sobě celulózové řetězce pokryté hemicelulózami. Hydroxylové skupiny v hemicelulózách jsou pro vodu snáze přístupnější než ty z celulózy. S degradací hemicelulóz tím pádem značně klesá hygroskopicita dřevní hmoty (Kocaeffe a kol., 2008). Společně s poklesem hygroskopicity také souvisí redukce bobtnání a sesychání, které zlepšuje rozměrovou stabilitu, což je jednou z hlavních výhod termicky modifikovaného dřeva. Bobtnání dřeva spočívá v nasycení buněčných stěn dřeva vázanou vodou, sesychání dřeva znamená opačný efekt. Uváděná redukce bobtnání a sesychání se odlišuje u každé technologie termické modifikace, avšak koluje v rozhraní 20 – 60 % oproti nemodifikovanému dřevu (Kubš, 2019; Kanát, 2020).

3.3.2 Hustota

Termicky modifikované dřevo dosahuje menší hustoty než nemodifikované. Hustota má vliv na pevnost a tvrdost modifikovaného dřeva. Hustota jako podíl hmotnosti a objemu klesá v závislosti na zvyšující se teplotě. Děje se tak v důsledku hmotnostní ztráty během modifikace (International Thermowood Association, 2003). Její redukce obvykle kolísá v jednotkách procent nicméně u vyšších teplot a časů může přesáhnout hranici 10 %. Objem termicky modifikovaného dřeva se v porovnání s původním, nemodifikovaným dřevem podstatně nemění, nicméně jeho hmotnostní ztráta je znatelnější z důvodu degradace či vypaření základních dřevních složek (Kanát, 2020).

3.3.3 Barva

Změna barvy je nejviditelnějším znakem termicky modifikovaného dřeva. Pro spotřebitele může častokrát hrát roli při výběru. Obecně lze konstatovat, čím vyšší je teplota termické modifikace spolu s dobou ohřevu, tím více dřevo tmavne (Obr. 2).



20 °C 100 °C 150 °C 200 °C 220 °C 240 °C 260 °C 280 °C
Obrázek 2 : Postupně zvyšující se vliv teploty na barvu dřeva, jedle (Kučerová a kol., 2016)

Jelikož dřevo získá zcela odlišnou barvu (více žluto hnědou, někdy až do černa) (Obr. 3), než mělo před vstupem do procesu, může dojít k jeho záměně s jinými, častokrát cizokrajnými, tropickými dřevinami. Zároveň je změna barvy žádanou vlastností, kdy z části dokáže takto modifikované dřevo dosáhnout vzhledu právě exotických dřevin, u kterých jsou jejich pořizovací náklady mnohem vyšší (Kanát, 2020).



Obrázek 3: Změny barvy dřeva procesem ThermoWood[®], borovice (International Thermowood Association, 2003)

Barva je ovlivněna podmínkami daného procesu termické modifikace respektive teplotou zpracování a dobou trvání. Po modifikaci získá dřevo specifický karamelový zápach. Termicky modifikované dřevo při vystavení v exteriéru díky povětrnostním podmínkám postupně mění barvu – šedne díky UV záření, tomuto jevu lze částečně předcházet nátěrovými ochrannými UV hmotami. Kromě teploty a doby ohřevu závisí výsledná barva také na prostředí modifikace, například při modifikaci na vzduchu je změna větší a rychlejší než v páře. Změna barvy vyplývá z barevné degradace a oxidací produktů VOC z hemicelulóz a extraktivních látek. Dřevo ovlivněno termickou modifikací s větším obsahem takových látek může výrazněji zapáchat, tím spíše, když je takové dřevo použité v rámci interiérové aplikace. Modifikované dřevo ovšem zachovává vizuální anatomickou strukturu dřeva, jako rozlišení jarního/letního dřeva nebo rozdíly mezi radiálními/tangenciálními řezy (Esteves, 2009).

3.3.4 Biologická odolnost

Obecně lze konstatovat, že termicky modifikované dřevo vykazuje vyšší odolnost proti biotickým činitelům, jako jsou dřevokazné houby a hmyz než nemodifikované dřevo nebo hniloba (Reinprecht, 2008; Esteves, 2009). Příkladem mohou být nemodifikované dřeviny označované dle normy jako netrvanlivé nebo slabě trvanlivé vůči biotickým činitelům dle ČSN EN 350 (2019) (Tab. 2), které se při termické modifikaci mohou stát méně trvanlivými až středně trvanlivými dřevinami (Reinprecht, 2008).

Tabulka 2: Klasifikace trvanlivosti proti dřevokazným houbám (ČSN EN 350, 2019)

Třída trvanlivosti	Popis
1	Velmi trvanlivé
2	Trvanlivé
3	Středně trvanlivé
4	Slabě trvanlivé
5	Netrvanlivé

Děje se tak zejména díky přeměně hydrofilních molekul v hemicelulózách na hydrofobní, neschopností plísní rozpoznat substrát nebo změně bodu nasycení lumenů. Dále také snížením podílu funkčních OH skupin nebo samotnou

degradaci hemicelulóz, které dřevokazné houby a hmyz potřebují. Jednu z nejlepších odolností vůči hnilobě vykazuje výrobní proces OHT[®], vede až k výsledné 2. třídě trvanlivosti podle ČSN EN 350 (2019) (Tab. 2). Při procesu Rétification nebo Plato procesu můžeme obecně hovořit o výsledné 3 nebo 4. třídě trvanlivosti. (Reinprecht, 2008). Je prokázáno, že bio-odolnost termicky praveného dřeva přímou úměrou stoupá s rostoucím stupněm jeho modifikace (International Thermowood Association, 2003). Termicky modifikované dřevo nevystavujeme kontaktu se zemí, ani jej neumísťujeme těsně nad zem z důvodu velkého obsahu vlhkosti v zemi resp. nad zemí kvůli rosnému bodu – dřevo pak z tohoto důvodu hnije, je tak stanoveno do 3. třídy podle ČSN EN 335 (2013) (Tab. 3).

Tabulka 3: Třídy ohrožení dřeva (ČSN EN 335, 2013)

Třída	Vlhkost dřeva [%]	Prostředí
0	10%	klimatizované obytné místnosti, relativní maximální vlhkost 60%
1	10 % až 20 %	neklimatizované suché interiéry
2	>20 %	neklimatizované interiéry, relativní maximální vlhkost 80%
3	>20 % + působení povětrnosti	exteriéry bez kontaktu se zemí
4	>20% + působení povětrnosti a kontakt se zemí	dřevo ve vodě či zemi (i částečně)
5	>20 % + působení mořské vody	dřevo v mořské vodě (i částečně)

3.4 Zpracování termicky modifikovaného dřeva

Obecně lze říci, že při práci s termicky modifikovaným dřevem je třeba dát si větší pozor než s nemodifikovaným dřevem. Dřevo lze skladovat stejnými způsoby jako dřevo nemodifikované, s dostatečnými proklady mezi svazky. Je křehčí, vyžaduje více péče a je náchylnější k mechanickému poškození než

nemodifikované dřevo. Vzhledem k jeho křehkosti, pro dosažení co nejlepší kvality je vhodné používat obráběcí nástroje s co nejostřejšími nástroji a zvýšené řezné rychlosti. Lze jej ovšem dále například řezat a dále obrábět stejnými způsoby jako nemodifikované dřevo. Během jeho obrábění je pravděpodobné, že se ze dřeva uvolní látky způsobující zápach. Při lepení termicky modifikovaného dřeva je třeba brát v úvahu delší dobu schnutí lepidel na vodní bázi díky snížené absorpci vody dřeva. Totéž lze konstatovat i o nátěrových hmotách (International Thermowood Association, 2003; CFP Woods, 2020).

4 Současné průmyslové technologie termické modifikace

Dá se říci, že všechny dnes komerčně využívané technologie nevyužívají při jeho výrobě žádných vysoce toxických nebo jinak zdraví ohrožujících látek. Hlavním médiem je zde teplo, a to v mnoha podobách od rostlinných olejů až po vodní páru. Všechny technologie termické modifikace podléhají v dané zemi ochranné známce a jsou patentovány.

4.1 PLATO

Název technologie PLATO vychází z označení Providing Lasting Advanced Timber Option. Proces výroby této technologie je náročnější než ostatní procesy termické modifikace, ovšem výsledné produkty kvalitou odpovídají náročnosti celého procesu. Technologie byla vyvinuta v Nizozemí firmou Platowood B. V. Výrobní proces se skládá ze čtyř hlavních částí. Průmyslová produkce se datuje k roku 2001, kdy byly produkty této technologie prvně dodány trh. Výrobky technologie PLATO jsou prodávány pod obchodním názvem PlatoWood®.

Nejprve se dřevo předeheje v průmyslové komoře pro získání vlhkosti mezi 14 – 18 %. Následuje hydrotermická úprava ve speciálním autoklávu z nerezové oceli (Obr. 4), kde je dřevo ohříváno nasycenou parou při tlaku 0,6 – 1 MPa na výslednou teplotu mezi 150 – 180 °C. Doba této fáze je odvislá od druhu dřeviny, objemu dřeviny a pohybuje se 4 až 5 hodinami. Následně se dřevo uloží do sušicí komory, kde se pomalu ohřívá a suší na vlhkost kolem 10 % po dobu 3 až 5 dní.

Vytvrzování dřeva trvá 14 až 16 hodin za teplot obvykle mezi 150 – 190 °C za atmosférického tlaku 0,1 MPa s omezeným přístupem kyslíku, děje se tak ve speciální velkokapacitní komoře. Obsah kyslíku v komoře je kontrolován a ponecháván na 2 % vstřikováním přehřáté páry, čímž se zabraňuje zapálení dřeva. Dřevu po vytvrzení klesne vlhkost pod 1 %. Vytvrzování dřeva probíhá za sucha a při atmosférických podmínkách. Konečným stupněm modifikace je klimatizování. Klimatizování, je prováděno ve stejné komoře jako sušení, trvá 2 až 3 dny. Během klimatizování se obsah vlhkosti zvyšuje na vhodnou úroveň pro výrobu (4 – 6 %). Topným médiem může být namísto přehřáté páry také horký vzduch (Militz a kol., 2001; Boonstra, 2008; Reinprecht, 2008; Čermák, 2013).



Obrázek 4: Dřevo vytažené z autoklávy (Platowood B. V, 2021)

Nejčastějšími použitými dřevinami jsou smrk, topol a fraké, v menší míře i borovice či jedle. Konečné zbarvení modifikovaného dřeva celým procesem se odvíjí od použité dřeviny a podmínek v jednotlivých krocích. Lze ovšem obecně tvrdit, že produkty PlatoWood[®] dosahují tmavě hnědé barvy, při vystavení v exteriéru dochází k obvyklému blednutí díky povětrnostním podmínkám (Hill, 2006; Platowood B. V, 2020).

Dřeviny používané pro produkty PlatoWood[®] pocházejí z lesů s certifikací FSC[®], což je proces kontroly, který deklaruje obhospodařování lesa v souladu s ekologickými a sociálními měřítky. Používané smrky pochází z lesů severní Evropy, tradičně dobře obhospodařovaných. Smrkové dřevo modifikováno tímto procesem se mění na kvalitní a odolný produkt s velkou rozměrovou stabilitou. Po procesu se změnila barva smrkového dřeva z běžné bělavé na teple hnědou. Takto modifikované smrkové dřevo je vhodné na obklady fasád, žaluzie či protihlukové bariéry (Obr. 5 a 6). Topolové po průchodu procesem získá zlatavý odstín. Dřevo je rozměrově stabilní, nenáročné na údržbu s předpokládanou životností 50 let. Fraké je exotické dřevo pocházející ze západní Afriky, na povrchu dřeva se nevyskytují žádné suky, charakteristický proměnlivý plamenný, pruhovaný vzhled dřeva je ještě více umocněn právě technologií PLATO. Fraké dřevo je po modifikaci vhodné například na obklady fasád (Obr. 7) nebo rámy oken či dveří (Militz a kol., 2001; Platowood B. V, 2020).

Obecné výhody produktů PlatoWood® jsou rozměrová stabilita, odolnost, životnost, trvanlivost, dobrá opracovatelnost, nízká potřeba údržby nebo zachování většiny mechanických vlastností nemodifikovaného dřeva. Byla rovněž zjištěna zlepšená přilnavost mezi modifikovaným dřevem a běžnými lepidly na dřevo (PU a PVAC). Kromě výše uvedených příkladů použití je vhodné zmínit ještě zahradní nábytek či oplocení. Za nevýhody se dá považovat pokles hodnot meze pevnosti, které dosahují mezi 5 – 20 % vůči původnímu, nemodifikovanému dřevu (Hill, 2006).



Obrázek 5: Geversduin Tree House, smrk, Castricum (Platowood B. V, 2020)



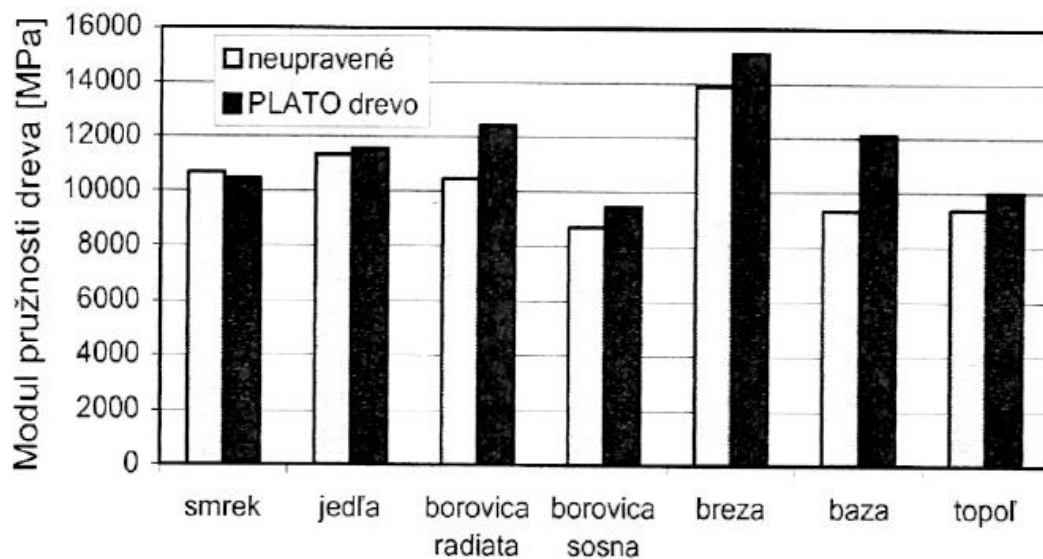
Obrázek 6: Plážové domky, smrk, Nieuwvliet-Bad (Platowood B. V, 2020)

Nižší mechanické ztráty modifikovaného dřeva jsou důsledkem relativně mírných podmínek ve srovnání s jinými termickými modifikacemi. MOE dosahuje maximálně o 10 % vyšší hodnoty než nemodifikované dřevo (Obr. 8).

Rovnovážná vlhkost dřeva je snížena o 30 – 40 %, z čehož vyplývá zvýšená odolnost vůči dřevokazným houbám. Sesychání modifikovaného dřeva vůči nemodifikovanému je přibližně poloviční (Hill, 2006).



Obrázek 7: Zastřešení plaveckého bazénu, fraké, Buckinghamshire (Platowood B. V, 2020)



Obrázek 8: Modul pružnosti dřeva vyrobeným PLATO procesem ve srovnání s nemodifikovaným dřevem (Reinprecht, 2008)

4.2 OHT

Název technologie je odvozen z označení Oil Heat Treatment, tedy termická modifikace za pomoci oleje. Technologie byla vyvinuta společností Menz Holz GmbH v Německu roku 2000 (Hill, 2006). V současnosti jednou z největších firem používající proces OHT proces je kanadská společnost Qijuk Design

Innovations Inc. Jak již vyplývá z názvu, při procesu probíhá ohřev dřeva za pomoci oleje v impregnačním autoklávu. Jde o efektivní metodu, která je zároveň šetrná k životnímu prostředí. OHT technologie se těší stále novým optimalizacím, které jí činí ještě účinnější.

Ještě než dojde k vlastní termické modifikaci, musí se impregnační nádoba (autokláv) zcela naplnit předehřátým přírodním olejem (Obr. 9). Olej zapříčiňuje rovnoměrný, rychlý přenos tepla s možností vylepšení trvanlivosti a fyzikálních vlastností dřeva (Bazyar a kol., 2012). Nejvíce se v současnosti používá olej řepkový, slunečnicový či lněný. Je důležité, aby použitý olej zabezpečil rovnoměrný a rychlý přenos tepla. Dochází i k používání modifikovaných rostlinných olejů jako např. anhydrid kyseliny maleinové, které se ve dřevě dobře zachytí a přispívají více k jeho bio-odolnosti (Reinprecht, 2008).



Obrázek 9: Autokláv společnosti Qijuk pro proces OHT (Qijuk Design Innovations Inc., 2020)

Surové dřevo je zcela ponořeno v autoklávu s olejem, je pomalu zahříváno na teplotu 180 – 220 °C, doba trvání je 2 až 4 hodiny. Olej neplní jenom funkci média použitého k přenosu tepla, ale také zabraňuje přítomnosti kyslíku, čímž dochází k omezení termo-oxidačních procesů (Hill, 2006; Reinprecht, 2008). Po zahřívání následuje chladicí fáze, kde je nejprve olej z autoklávu odčerpán a dřevo

je ochlazeno. Děje se tak stále v autoklávu po dobu kolem 18 hodin (Reinprecht, 2008; Čermák, 2013). Nevýhodou u této technologie může být jeho zápach oleje během procesu. Je rovněž zapotřebí pravidelně kontrolovat stav oleje z důvodu možného uvolňování dřevních extraktivních látek do něj.

Nejčastěji modifikovanými dřevinami OHT procesem jsou borovice, osika a smrk. Dřevo je charakteristické svojí tmavě hnědou barvou a výraznějším zápachem způsobeným olejem. Bobtnání a sesychání je redukováno přibližně o 40 % (Hill, 2006; Bazyar a kol., 2012). Díky přítomnosti zbytkových olejů a vosků je u této technologie snížena odolnost dřeva oproti ohni (Reinprecht, 2008).

Jako výhody pokládáme u produktů vyrobených OHT procesem malou náchylnost vůči napadení hmyzem, ekologickou nezávadnost nebo výborné akustické vlastnosti. Nevýhodou může být počáteční zápach výrobků, nicméně při jejich vystavení v exteriéru je tento zápor anulován. Výrobky vyrobené OHT procesem nachází uplatnění jako architektonické obklady, nábytek, akustické nástroje, sportovní a rekreační vybavení (Obr. 10) (Rapp a kol., 2000; Dubey, 2010; Qijuk Design Innovations Inc., 2020).



Obrázek 10: Výrobky vyrobené OHT procesem (Qijuk Design Innovations Inc., 2020)

4.3 Rétification, Le Bois Perdure

Z Francie pochází dvě metody termické modifikace: Rétification (dále Retifikace) a Le Bois Perdure. Retifikace byla vyvinuta francouzskou vysokou školou École des Mines de St. Etienne.

Při Retifikaci je dřevo nejprve předsušeno na vlhkost 12 %. Poté je zavřeno do komory, kde je postupně ohříváno na teplotu 210 – 240 °C. Děje se tak v inertním prostředí dusíku, kde dusík zabezpečuje podíl kyslíku do 2 %. Dřevo si

u tohoto procesu víceméně zachovává svojí původní pevnost, protože v něm dochází k menšímu podílu termo-oxidačních reakcí (Hill, 2006; Reinprecht, 2008; Esteves a kol., 2009; Čermák, 2013). Délka Retifikace se pohybuje mezi 8 až 24 hodinami (Sandberg, 2017).

Druhou metodou je Le Bois Perdue, která byla vyvinutá společností BCI-MBS v polovině 90. Let a je podobná Retifikaci. Používáním způsobu termické modifikace Le Bois Perdue také vynikla kanadská firma PCI Industries Inc., sídlící v Quebecu. Dřevo v surovém stavu je v ohřívací komoře ohříváno na teplotu kolem 200 – 230 °C v prostředí s horkou parou a horkými spalinami, které dřevo produkuje během procesu ohřívání. Děje se tak za atmosférického tlaku. Celý proces termické modifikace trvá mezi 12 až 18 hodinami (Hill, 2006; Esteves, 2009; Čermák, 2013; Sandberg, 2017).

4.4 ThermoWood

Tento proces je nejpoužívanějším v Evropě. Byl vyvinut ve Finsku na přelomu tisíciletí společností VTT (Technical Research Center of Finland) ve spolupráci YTI (Institute of Environmental technology, Mikkeli), Technickou univerzitou v Tampere a s finským dřevozpracujícím průmyslem. Proces je v dnešní době chráněný licencí vlastněnou International ThermoWood Association založenou v roce 2000, pouze její členové mohou užívat pro své výrobky název ThermoWood®. Technologie nevyužívá žádných toxických, chemických látek. Proces probíhá bez přítomnosti zvýšeného tlaku a pouze za přítomnosti páry omezující oxidační reakce. Přítomnost vzduchu se z tohoto důvodu pohybuje mezi 3 – 5%. Technologie je navržena tak, aby celá výrobní fáze probíhala v jednom uceleném zařízení. Jde o dlouhý tunel s několika komorami, uzpůsobenými rozličné fáze celého procesu termické modifikace. Proces modifikace ThermoWood® probíhá ve třech stupních:

1. V prvním stupni dochází k ohřevu a vysokoteplotnímu sušení, z hlediska času se je první stupeň časově nejnáročnějším (24 až 48 hodin). Doba sušení závisí na počáteční vlhkosti dřeva, dané dřevině či jeho tloušťce. Dřevo do tohoto stupně vstupuje buď v surovém stavu anebo už suché. V první komoře se prudce zvýší teplota na 100 °C. Následně je pomalu zvýšena na

130 °C pro vysokoteplotní fázi, která redukuje vlhkost téměř až na nulovou hranici. Médiem pro ohřev dřeva je pára nebo horký vzduch.

2. Během druhého stupně, který začíná bezprostředně po prvním, přechází dřevo do druhé komory. Teplota se zvýší na 185 – 230 °C a je udržována po dobu 2 až 3 hodin. Pára, která zde funguje, jako ochranný prvek proti vznícení dřeva současně snižuje nežádoucí chemické reakce. Čas termické modifikace zde závisí od plánované, budoucí třídy dřeva (Thermo-S, Thermo-D).
3. Při třetím stupni je dřevo pomalu chlazeno a klimatizováno. Teplota v komoře se sníží na požadovanou úroveň 80 – 90 °C pomocí vodního postřiku. Dřevo se zvlhčuje parou z důvodu získání vlhkosti na použitelnou úroveň 4 – 7 %. Je potřeba postupovat velice opatrně, aby nedošlo k příliš velkému teplotnímu rozdílu mezi dřevem a venkovním vzduchem po otevření komory. V závislosti na dřevině nebo konečné teplotě třetí stupeň trvá mezi 5 až 15 hodinami (International Thermowood Association, 2003; Hill, 2006; Reinprecht, 2008; Čermák, 2013).

Vstupní kvalita dřeva má zásadní vliv na konečnou kvalitu termicky modifikovaného produktu. U této technologie jsou nejvíce používanými dřevinami borovice, smrk, bříza a osika. Borovicové a smrkové dřevo se používá zejména pro exteriérové aplikace (International Thermowood Association, 2003).

Tabulka 4: Teploty modifikace pro třídy technologie ThermoWood (International Thermowood Association, 2003)

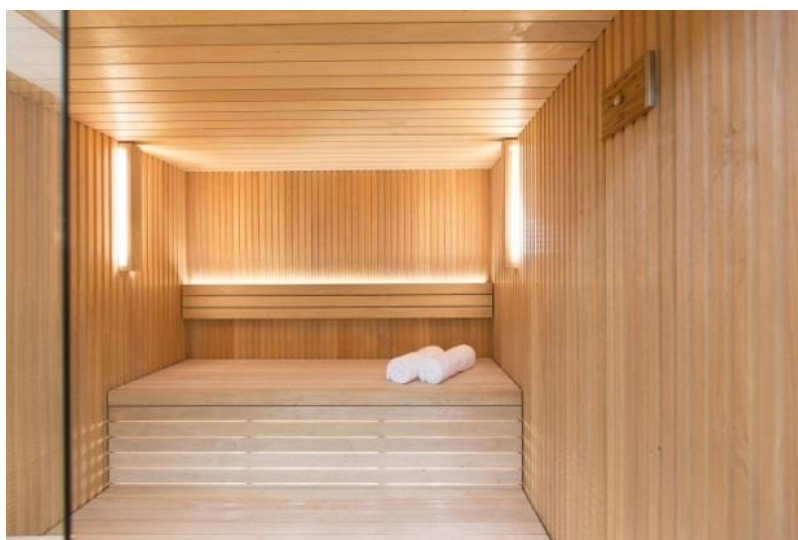
Třída	Jehličnaté dřeviny	Listnaté dřeviny
Thermo-S	190 °C	185 °C
Thermo-D	212 °C	200 °C

Produkty ThermoWood[®] se rozdělují na dvě základní třídy použití, a to Thermo-S a Thermo-D (Tab. 5), lišící se teplotou termické modifikace (Tab. 4). U třídy Thermo-S označení 'S' pochází z anglického slova 'stability' čili stabilita. Je

charakteristická mírnějším průběhem termické modifikace a zlepšenou rozměrovou stabilitou. Podle trvanlivosti a odolnosti dřeva vůči hnilobě řadíme se třída Thermo-S řadí do kategorie 3, což je středně trvanlivé dřevo dle normy ČSN EN 350 (2019) (Tab. 2). Bobtnání a sesychání činí u této třídy 6 – 8 %. Produkty zde nachází uplatnění jako nábytek, vybavení saun (Obr. 11), obklady nebo protihlukové bariéry.

Tabulka 5: Souhrn účinků procesu ThermoWood na vlastnosti dřeva podle třídy (International Thermowood Association, 2003)

Vlastnosti	Jehličnaté dřeviny		Listnaté dřeviny	
	Thermo-S	Thermo-D	Thermo-S	Thermo-D
Odolnost vůči povětrnostním vlivům	+	++	beze změny	++
Rozměrová stabilita	+	++	+	+
Ohybová pevnost	beze změny	—	beze změny	—
Barevná tmavost	+	++	+	++



Obrázek 11: Sauna z produktu Thermo-S (Finská sauna – Horavia s.r.o., 2020)

Třída Thermo-D představuje výrobky ovlivněné intenzivnější termickou modifikací (Obr. 12). Označení ‘D‘ pochází z anglického slova ‘durability‘ čili trvanlivost. Vyznačuje se tmavší barvou než produkty Thermo-S, dobrou

rozměrovou stabilitou a vyšším stupněm odolnosti vůči biologickým činitelům. Bobtnání a sesychání se pohybuje kolem 5 – 6 %. Z hlediska trvanlivosti a odolnosti dřeva vůči hnilobě se třída Thermo-D řadí do druhé kategorie, což je trvanlivé dřevo dle normy ČSN EN 350 (2019) (Tab. 2). Výrobky Thermo-D nacházejí uplatnění v exteriéru jako zahradní nábytek, dětské hřiště, dále v saunách nebo koupelnový nábytek (International Thermowood Association, 2003). ThermoWood® vzhledem ke svým vlastnostem dokáže také plnit estetickou funkci a příhodně splňuje dnešní, čím dál více posouvající se kritéria designu (Kubš, 2019).



Obrázek 12: Produkt Thermo-D, borovice (Fasady-Terasy Thermowood, 2020)

5 Porovnání současných technologií termické modifikace

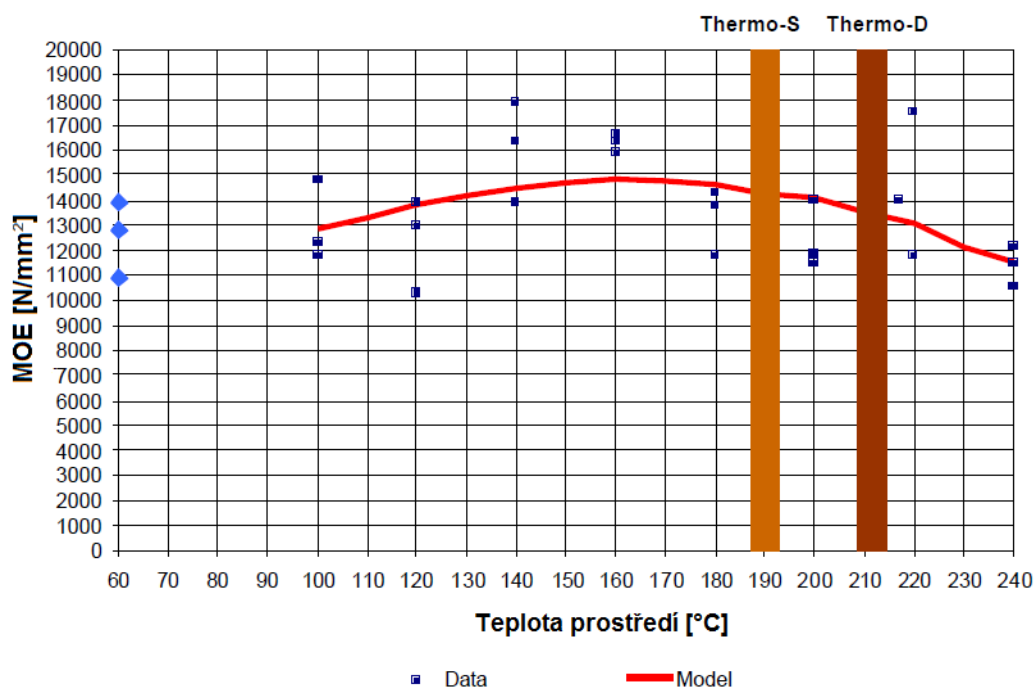
Konečné vlastnosti termicky modifikovaných produktů jsou odlišné v závislosti na použité metodě. Volba či změna technologie je prostředkem pro dosažení žádoucích vlastností, ať už mechanických, fyzikálních nebo estetických (Tab. 6).

Tabulka 6: Srovnání podmínek komerčně používaných termických modifikací (Sandberg a kol., 2017)

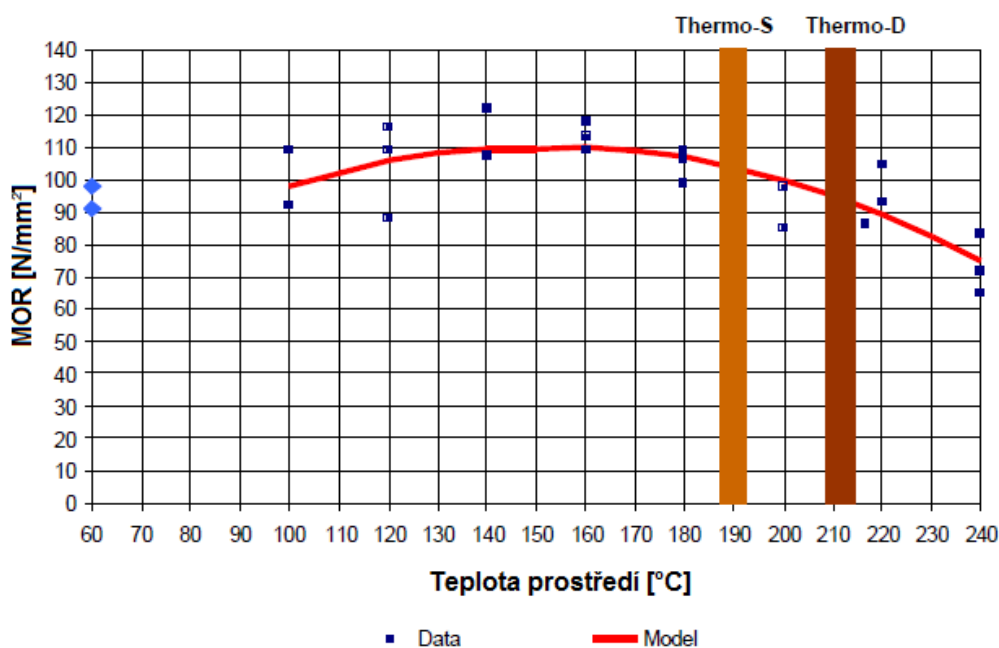
Technologie	Obchodní značka	Potřebná vstupní vlhkost [%]	Teplota [°C]	Doba trvání [h]	Tlak	Prostředí
PLATO	PlatoWood®	14-18	150-180	cca 150	atmosf.	pára
OHT	OHT®	surový stav, 10	180-220	18	–	rostlinný olej
Rétification	Retiwood®	12	210-240	18 až 24	–	dusík
Le Bois Perdure	Perdure®	surový stav	200-230	12 až 18	atmosf.	pára
ThermoWood	ThermoWood®	surový stav, 10	130/185-230/80-90	24-48/2-3/5-15	atmosf.	horký vzduch, pára

U technologie ThermoWood® se MOE příliš nemění u obou produktů Thermo-S a Thermo-D (Obr. 13). MOR klesá více u Thermo-D, protože jeho modifikace probíhá za vyšší teploty, klesá až o 50 % (Obr. 14). Rovnovážná vlhkost dřeva je zde redukována o 40 – 50 % oproti původnímu, nemodifikovanému dřevu.

U technologie Plato je MOE až o 10 % vyšší než u nemodifikovaného dřeva, oproti tomu MOR klesá o 5 – 20 % oproti nemodifikovanému dřevu (Obr. 15). Rovnovážná vlhkost dřeva je redukována o 30 – 40 %.

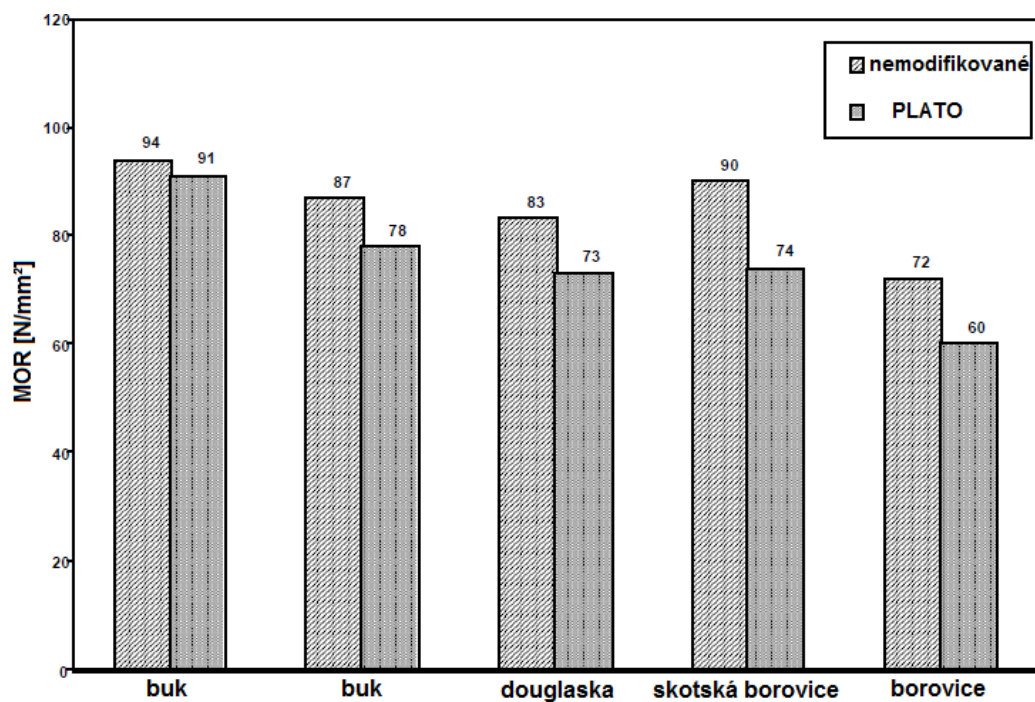


Obrázek 13: Vliv termické modifikace ThermoWood[®] na modul pružnosti v ohybu (International Thermowood Association, 2003)



Obrázek 14: Vliv termické modifikace ThermoWood[®] na ohybovou pevnost (International Thermowood Association, 2003)

Při technologii OHT (modifikací pomocí rostlinného oleje) s modifikací ThermoWood[®] (pára, horký vzduch) MOE dosahuje velmi podobných hodnot. U francouzské metody Retifikace oproti nemodifikovanému dřevu MOE klesá mezi 11 – 20 %, u MOR až k 40 % (Hill, 2006; Esteves a kol., 2009).



Obrázek 15: Porovnání ohybové pevnosti dřeva modifikovaného PLATO procesem a nemodifikovaného dřeva (Militz a kol., 2001)

6 Inovativní technologie termické modifikace

6.1 Termovuoto

Proces byl vyvinut Národní radou pro výzkum v Itálii a Švédskou zemědělskou univerzitou. Proces Termovuoto alternativou ke klasickým, již zaběhlým technologiím. Během procesu dochází ke snižování obsahu kyslíku uvnitř termo-vakuové komory (Obr. 16). Spolu s kyslíkem jsou vakuovým čerpadlem odsávány různé těkavé látky a vodní pára. Výhodou procesu je nižší spotřeba energie, kratší doba trvání nebo nepřítomnost zápachu z těkavých látek odvedených právě odsáváním. Dřevo je nejprve vakuově sušeno teplotou 100 °C než dosáhne vlhkosti 0 %. Ve stejné komoře se poté provádí vlastní termická modifikace v teplotním rozmezí 160 – 220 °C po dobu až 25 hodin, v závislosti na typu dřeva. V tomto prostředí vakua ční tlak 150 – 350 hPa. Dřevo je dále ochlazováno a klimatizováno na teplotu 90 °C bez přidaného chladiva či kontaktu s okolním vzduchem. Výrobky technologie Termovuoto jsou komerčně prodávány pod názvem VacWood[®]. Například při srovnání s technologií ThermoWood[®], technologie Termovuoto nabízí výrobky s podobnými chemickými a fyzikálně-mechanickými vlastnostmi, avšak s určitými vizuálními rozdíly. Rovnovážná vlhkost výrobků VacWood[®] se pohybuje mezi 4 – 8 %.

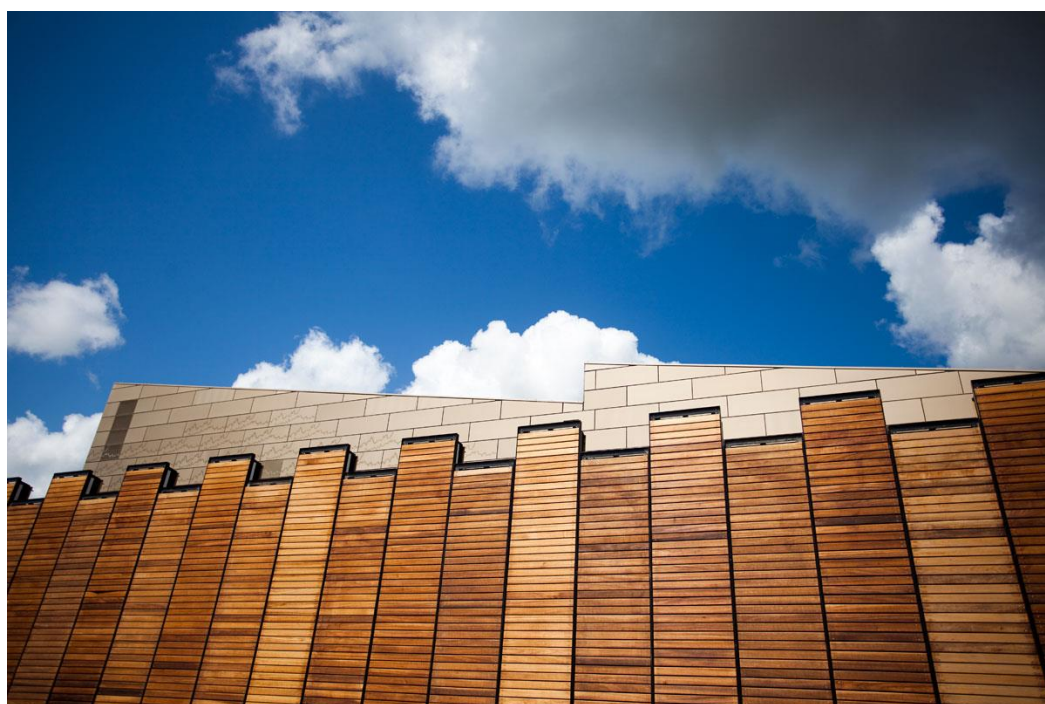


Obrázek 16: Termo-vakuová komora (WDE Maspell SRL, 2020)

Výrobky VacWood[®] nachází uplatnění jako parkety, lodní vybavení nebo při rekonstrukce domů. Nejvíce využívanými dřevinami jsou smrk, jedle a buk (Sandberg a kol., 2017; Jebrane a kol., 2018; WDE Maspell SRL, 2020).

6.2 FirmoLin

FirmoLin je technologie vyvinuta a používána nizozemskou firmou FirmoLin Technologies B.V. Dřevo je v autoklávu ohříváno přehřátou párou o teplotě kolem 175 °C a tlakem 7 barů. Tlak a teplotu lze během procesu regulovat nezávisle na reakcích ve dřevě během modifikace. Na základě této kontroly lze ovlivňovat obsah vlhkosti ve dřevě, od kterého se odvíjí konečné vlastnosti produktů. Celková doba procesu je menší než 24 hodin. Mohou se používat téměř všechny dostupné dřeviny. Výsledné produkty vykazují značnou redukci bobtnání a sesychání (větší rozměrovou stabilitu). Nejčastěji nachází použití jako obklady (Obr. 17) nebo zahradní nábytek. Produkty jsou také vhodné pro exteriérové aplikace při extrémně proměnlivých povětrnostních podmínkách (Williams, 2014; Williams a kol., 2018, 2019).



Obrázek 17: Muzeum Castellum Hoge Woerd, Utrecht (Aafke Holwerda, 2021)

6.3 WTT

Celým názvem Wooden Treatment Technology. Technologie pochází z Dánska a je produkována společností WTT Service ApS. Jde o inovativní proces používající olej jako médium pro přenos tepla, jak ve fázi ohřevu, tak i v chlazení.

Modifikace je realizována v autoklávu vyrobeným z nerezové oceli (Obr. 18). Dřevo je v něm modifikováno pod tlakem v atmosféře bez obsahu vzduchu během fáze ohřevu a chlazení a pouze s malým obsahem páry. Proces při modifikaci používá vysoké tlaky a nízké teploty. Délka procesu se pohybuje kolem 12 hodin a je možné použít téměř všechny dostupné dřeviny. Technologie je stále ve vývoji a není ještě natolik komerčně etablovaná (WTT Service ApS, 2021). Podobný princip využívá i další rakouská technologie Huber Holz, která je založena na využití páry při modifikaci. Bližší informace o těchto technologiích nejsou uváděny.



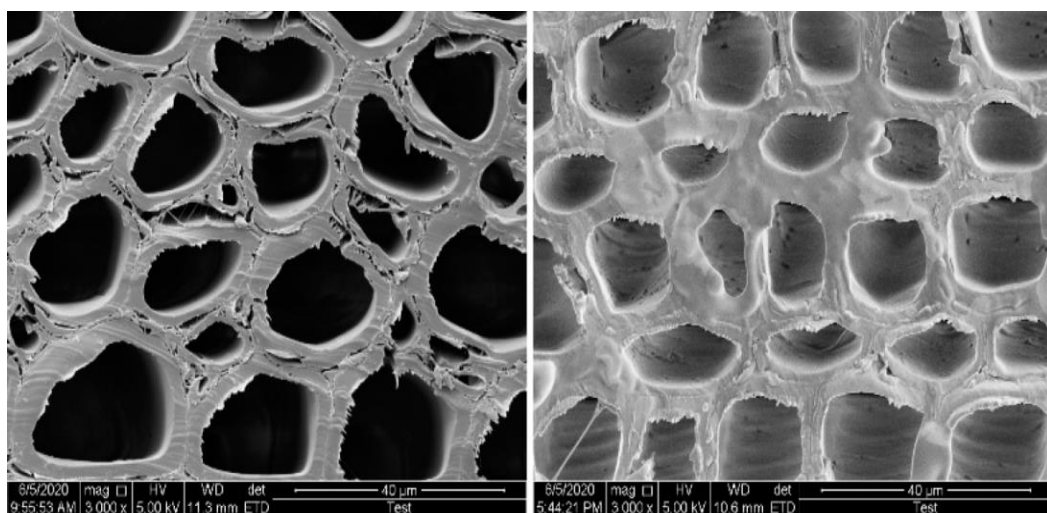
Obrázek 18: Autokláv společnosti WTT (WTT Service ApS, 2021)

6.4 Modifikace parafínem

Participace vosků při termické modifikaci má určité výhody. Vosky odpuzují vodu, tzn. jsou hydrofobní, zlepšují odolnost dřeva vůči termitům, jsou ekologicky nezávadné a netoxické. Mechanické vlastnosti jako pevnosti v tlaku a ohybu zůstávají stejné jako u nemodifikovaného dřeva. Metoda termické modifikace impregnací dřeva parafínem je v současnosti předmětem studií a výzkumů, do průmyslové produkce má metoda ještě dalekou cestu. Parafín patří mezi vosky, je to amorfni směs nasycených uhlovodíků (alkanů), která se vyrábí destilací z ropy. Díky svým hydrofobním vlastnostem se používá v mnoha odvětvích včetně stavebnictví nebo kosmetickém průmyslu. V dřevozpracujícím průmyslu se používá jako přídavek sloužící k zlepšení rozměrové stability a odpuzování vody například při výrobě OSB a DTD desek.

V první fázi procesu je parafín zcela roztaven v ocelových nádobách za teplot 80 – 100 °C. V druhé fázi je dřevo ponořeno v roztaveném parafínu za přítomnosti atmosférického tlaku při 100 °C po dobu 1 hodiny. Ve třetí fázi je teplota parafínu postupně zvyšována zhruba do 200 °C, u čtvrté fáze teplota zůstává konstantní po dobu až 4 hodin. Poslední, pátá fáze představuje chlazení a odvedení neabsorbovaného parafínu z povrchu dřeva. Parafín obalí buněčné stěny (Obr. 19), což vede k zlepšení odolnosti vůči vodě a zvýšení odolnosti vůči hnilobě u některých druhů až o 90 % oproti nemodifikovanému dřevu. Bobtnání je redukováno až o 30 %, pevnost v ohybu je v průměru snížena o 32 % a tvrdost rovněž snížena v průměru o 30 %. Pro modifikaci parafínem se nejčastěji používá bukové dřevo. Parafínem modifikované produkty je možno použít v náročnějších prostředích, jako jsou sauny, koupelny, bazény nebo obložení fasád (Reinprecht a kol., 2019). Lze předpokládat, že nedochází k tak výrazným změnám ve dřevě, jako u již zavedených metod termické modifikace, čili dopad na mechanické vlastnosti nebude tak značný.

Předmětem studií je také zlepšování vlastností parafínu přidáváním různých aditiv, jako například nanočásticemi oxidu křemičitého SiO₂. Taková emulze je následně schopna vylepšit nejen odolnost vůči vodě, nýbrž i tepelnou stabilitu dřeva (Runhao a kol., 2020).



Obrázek 19: Nemodifikované dřevo (vlevo), obalení buněčných stěn parafínem (vpravo) (Runhao a kol., 2020)

7 Netermické modifikace dřeva

7.1 Chemická modifikace

Skrze působení a reakce chemických látek v dřevních komponentech lze vytvářet nové chemické vazby ve dřevě. Chemické látky mohou pronikat do dřevních lumenů nebo až do buněčných stěn. Jedním z principů chemické modifikace je také impregnace. Chemická modifikace se provádí za účelem zlepšení vlastností dřeva jako omezení reakce s vodou - bobtnání a sesychání, rozměrové stability, odolnosti vůči termitům, vodních organismů nebo ochraně proti UV záření. Mezi používané látky při termické modifikaci patří acetanhydridy (anhydridy kyseliny octové), izokyanáty, epoxidy karboxylové kyseliny nebo živice. Mechanické vlastnosti chemicky modifikovaného dřeva (MOE, MOR) se oproti nemodifikovanému dřevu mění jen v malé míře. Tvrdost oproti nemodifikovanému dřevu narůstá přibližně o 15 – 30 % (Reinprecht, 2008; Ibach, 2010; Mantanis, 2017).

7.1.1 Acetylace

Acetylace je jedna z komerčně nejvyužívanějších metod chemické modifikace. Často se setkáváme právě s acetylací anhydridem kyseliny octové. Jde o chemickou reakci, kdy se zavádí funkční acetylová skupina do organické sloučeniny za vzniku nových acetylových skupin, díky čemuž se omezí absorpce vody buněčnými stěnami. To má za následek nejen eliminaci rozměrové stability dřeva, ale i vzniku hniloby a plísní. Důvodem, proč se mechanické vlastnosti acetylovaného dřeva oproti původnímu, nemodifikovanému nemění, je teplota během vlastního procesu acetylace, která není tolik vysoká (120 – 140 °C). S acetylovaným dřevem se nejčastěji setkáváme pod obchodním názvem Accoya[®]Wood. Nejpoužívanějšími dřevinami jsou borovice a olše (Hill, 2006; Ibach, 2010; Mantanis, 2017). Výrobce produktů Accoya[®]Wood, firma Accsys Technologies PLC garantuje záruku 25 let pro výrobky umístěné v zemi či vodě (Obr. 20). Výrobky Accoya[®]Wood se používají například jako venkovní okna a dveře, obklady, podlahy teras nebo i nosné konstrukce (Obr. 21) (Accsys Technologies PLC, 2021).



Obrázek 20: Most pod hladinou příkopu, Halsteren (Viaggidiarchitettura, 2012)



Obrázek 21: Mostová konstrukce, Sneek (Archdaily, 2020)

7.1.2 Furfurylované dřevo

Technologie výroby furfurylovaného dřeva je založena na principu impregnace dřeva furfuryl-alkoholovými živicemi $C_5H_6O_2$, které společně s katalyzátory, například chloridem zinečnatým $ZnCl_2$, vstupují do dřevní hmoty. Po vlastní impregnaci, kdy se živice dostávají do buněčných stěn, nastává proces

vytvrzení. Živice, které se neuchytí v buněčných stěnách, jsou ještě před vytvrzením z lumenů vytaženy ven. Proces furfurylace se provádí za účelem vylepšení rozměrové stability, tvrdosti a v neposlední řadě také ke zlepšení bio-odolnosti dřeva. Proces furfurylace dřeva je stejně jako děj termické modifikace šetrný k životnímu prostředí. Technologie stále prochází vývojem a může být při něm použito i mikrovlnného ohřevu.

V současnosti je technologie furfurylace dřeva nejvíce komerčně prodávána norskou firmou KEBONY AS. Co se týče bio-odolnosti, furfurylované dřevo řadíme stejně jako dřevo Accoya[®] Wood do první až druhé třídy trvanlivosti dle ČSN EN 350 (2019) (Tab. 2). Vyrábějí se dvě třídy výrobků a to Kebony Clear[®] resp. Kebony Character[®]. Firma poskytuje na své výrobky záruku 30 let. Pro výrobu produktů Kebony Clear[®], které jsou charakteristický svou tmavou barvou, se používá borovice a javor. Nachází využití především jako podlahy, kde dokáží zastoupit i tvrdé tropické dřevo. Oproti tomu produkt Kebony Character[®], mající zlatavě hnědou barvu, je vyráběný z borovice a nachází uplatnění jako podlahy teras, obklady, střešní krytiny nebo zahradní nábytek (Reinprech, 2008; Mantanis, 2017).

Ve srovnání s nemodifikovaným dřevem se furfurylované dřevo vyznačuje větší tvrdostí, větším MOR a větší křehkostí. Rovněž vykazuje silnou odolnost vůči povětrnostním vlivům, jeho bobtnání a sesychání je oproti nemodifikovanému dřevu redukováno o více než 50 % (Sandberg a kol., 2017).

Jelikož obdobně jako acetylované dřevo je furfurylované dřevo odolné vůči mořské vodě, čili je vhodné pro stavbu přístavů, mol nebo dokonce i paluby lodí. Při dlouhodobém vystavení povětrnostním podmínkám v exteriérových aplikacích furfurylované výrobky však získávají stříbrno šedou patinu, která však nemá žádný vliv na mechanické vlastnosti či bio-odolnost. Původní barva může být udržována pomocí ochranných UV olejových hmot.

Výrobní náklady pro výrobu furfurylovaného dřeva jsou nižší ve srovnání s procesem acetylce dřeva. Naproti tomu v obecném srovnání s termicky modifikovanými výrobky cenu produktů Kebony nelze individuálně určit, cena se odvíjí od cíle a typu daného projektu (Hill, 2006; Kebony AS, 2016).

7.1.3 Impregnace vinylovými monomery

Podstata metody spočívá v impregnaci dřeva vinylovými monomery s jejich následnou polymerací ve dřevě. Děje se tak v zásadě v dřevních lumenech, jen málo v buněčných stěnách. Nejčastěji používanými vinylovými monomery jsou akryláty (methylakrylát, chlorostyren) nebo styren.

Metoda slibuje zlepšení mechanických vlastností, rozměrové a tepelné stability, bio-odolnosti, a to zejména u dřevin, které jsou označovány v zásadě málo trvanlivé (Sandberg a kol., 2017). Bližší informace o této metodě z hlediska trvanlivosti a odolnosti v exteriéru nejsou uváděny z důvodu menší četnosti používání.

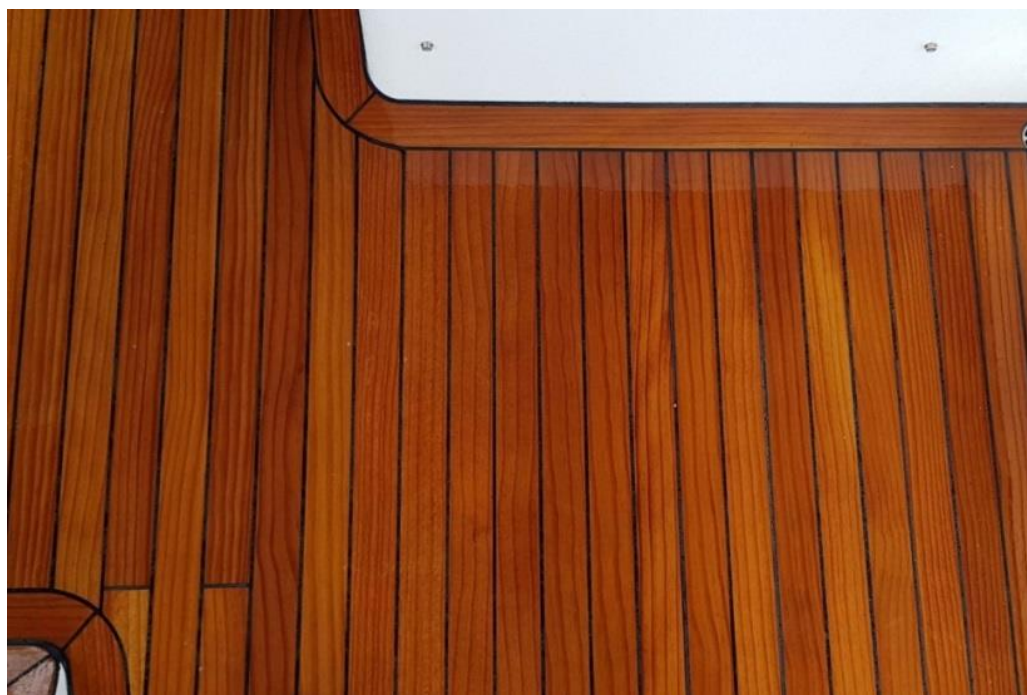
7.1.4 Impregnace fenol-formaldehydovými živicemi

Technologie, která využívá impregnaci masivního rostlého dřeva fenol-formaldehydovými živicemi pochází od společnosti LIGNIA Wood Company Ltd. Dřeviny používané pro tuto technologii jsou pečlivě vybírány a pochází z lesů s certifikací FSC[®], nejčastěji je používána borovice. Po vlastní impregnaci živicemi, je dřevo sušeno a projde vytvrzením a vysokých teplot. Touto metodou modifikace se lze poměrně snadno dosáhnout vlastností tvrdých listnatých dřev. Ačkoliv formaldehyd jako takový je karcinogenní a těkavou látkou nebezpečnou pro zdraví člověka, zde jsou jeho výpary ve dřevě na netoxické úrovni, a to po celou dobu trvání procesu.

LIGNIA Wood Company Limited poskytuje na své produkty 50 letou záruku v rámci odolnosti vůči dřevokazným houbám a hnilobě. Produkty Lignia[®] časem zachovávají původní barvu vystavením v exteriéru povětrnostním vlivům. Vlhkost a s ní spojené bobtnání a sesychání zde nejsou oproti nemodifikovanému dřevu nijak redukovány, jejich hodnota tedy pouze záleží na okolním prostředí. Používá se jak pro interiérové aplikace (kuchyňské linky, nábytek), tak i pro exteriérové (podlahy teras, obklady, dveře, zahradní nábytek, okenní rámy). Speciálním produktem určeným pro paluby jacht a lodí je Lignia[®] Yacht (Obr. 22).

Nabízí alternativu vůči zejména dražšímu tropickému teaku, který je jednou z nejpoužívanějších dřevin u palub lodí. Kromě výše uvedených vlastností náležících k originální technologii Lignia[®], tento produkt disponuje větší tvrdostí,

pevností v ohybu, hustotou a zlato hnědou barvou připomínající právě teak (LIGNIA Wood Company Ltd., 2021).



Obrázek 22: Produkt Lignia[®] Yacht na palubě lodi (LIGNIA Wood Company Ltd., 2021)

Kromě technologie, kterou využívá společnost LIGNIA Wood Company Ltd pro masivní rostlé dřevo lze fenol-formaldehydovou živici využít na výrobu vrstvených dřevních materiálů jako Impreg a Compreg.

7.1.4.1 Impreg

Impreg je materiál, podobný překližce sestávající se ze souboru dých impregnovaných fenol-formaldehydovými živicemi a slisovaných do jednoho celku (Obr. 23). Jednotlivé dýhy jsou v živicích máčeny za atmosférického tlaku a běžné teploty, následně projdou procesem sušení a vytvrzování. Konečným procesem je slisování dých do tlustších desek za nízkého tlaku. Obvykle se používají dýhy o tloušťce maximálně 8 mm. Pro dýhy se dají použít takřka všechny dostupné dřeviny kromě borovice, kvůli vyššímu obsahu nežádoucí pryskyřice pro výrobu dých. Impreg se v porovnání s nemodifikovaným dřevem nebo obyčejnou překližkou vyznačuje velmi dobrou rozměrovou stabilitou (bobtnání a sesychání je redukováno až o 25 %) a podstatně vyšší bio-odolností.

Impreg má rovněž vyšší tepelně izolační vlastnosti, jako i odolnost vůči kyselinám a elektrickému proudu. Mechanické vlastnosti mohou být rozdílné, například pevnost v tahu značně klesá a naopak pevnost v ohybu mírně vzrůstá. Impreg nachází použití při vytváření šablon na odlévání, různých modelů nebo nosné desky pro rozvodové skříně a transformátory (Ibach 2010; Sanberg a kol. 2017).



Obrázek 23: Materiál Impreg (Rohit Gurjar, 2017)

7.1.4.2 Compreg

Compreg (Obr. 24) je starší metoda impregnace dřeva fenol-formaldehydovou živicí a jeho následnou mechanickou modifikací (zhuštěním). Podobně jako Impreg ho tvoří dýhy impregnované fenol-formaldehydovými živicemi. Soubor dých je poté lisován za velmi vysokého tlaku až 25 MPa, což má za následek zhuštění dých. Následně je rovněž za vysoké teploty 150 °C vytvrzen. Pro výrobu dých se mohou použít skoro všechny dostupné dřeviny kromě těch, co obsahují pryskyřici. Ve srovnání s nemodifikovaným dřevem se Compreg obdobně jako Impreg vyznačuje výbornou rozměrovou stabilitou, bio-odolností, nízkou tepelnou vodivostí, bobtnáním a sesycháním redukováním přibližně o 25 % až 33 %.

Pevnostní vlastnosti jsou takřka totožné s materiálem Impreg, tvrdost je desetkrát až dvacetkrát vyšší oproti nemodifikovanému dřevu. Compreg nachází použití u výroby přípravků, v strojírenském průmyslu, tepelný a elektrický izolační materiál, šablon (Obr. 25), rukojetí nožů či v leteckém průmyslu. V exteriéru se používá také pro části sedadel na stadionech, lavičky nebo také pro

architektonické prvky. Je prodáván pod obchodními značkami Lignostone[®], Lignofol[®] nebo Panzerholz[®] (Ibach 2010; Senol a kol., 2016; Sanberg a kol. 2017; Passauer a kol., 2021).



Obrázek 24: Různé použití compregu v praxi (WorthPoint, 2021; NDZ Performance, 2021)

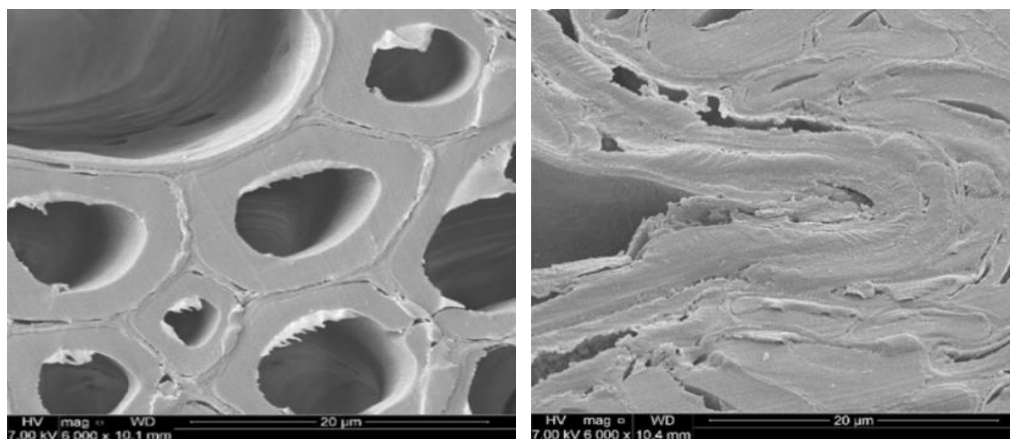


Obrázek 25: Šablony z materiálu Lignofol[®] (Paged Trade Sp. z o.o., 2021)

7.2 Mechanická modifikace

Dřevo jako konstrukční materiál použitelný pro konstrukční aplikace vyžadující vysokou odolnost, tvrdost a trvanlivost je obecně bráno za nevyhovující materiál z pohledu odolnosti, tvrdosti a trvanlivosti. Mechanické vlastnosti dřeva jsou provázány především s jeho hustotou. Z toho důvodu se

provádí mechanická modifikace dřeva. Procesem zvýšením jeho hustoty (densifikace) se může dosáhnout velmi odolného materiálu a vysokou rozměrovou stabilitou, tvrdostí a bio-odolností. Mechanicky zhuštěné dřevo je vhodné právě pro konstrukční aplikace, kde je vyžadována dostatečná pevnost, tuhost a trvanlivost. Cílem této modifikace je dosažení trvalé deformace dřevních buněk. Je tak vhodné vylepšit mechanické vlastnosti dřevin s nízkou hustotou a vytvořit z nich mnohem hodnotnější výrobky. Mechanická modifikace je ovšem vhodná i pro dřeviny s vysokou hustotou. Hustota dřeva závisí na tloušťce buněčných stěn a velikosti dřevních lumenů (Obr. 26). Dřevo může být také impregnováno chemickými látkami, a následně být lisováno. Klíčovými vlastnostmi celého procesu je druh použité dřeviny, typ plastifikace, metoda vlastního zhuštění a lisovací tlak. Plastifikace je fyzikálně-chemický proces, který činí dřevo více tvárným, více měkčím kvůli dosažení co nejoptimálnějších vlastností dřeva před lisováním. Nejčastější metodou plastifikace je hydrotermální metoda pomocí páry, nicméně díky své energetické a časové náročnosti je ve vývoji například metoda za pomoci mikrovlnného ohřevu. Proces zhušťování zahrnuje zprvu plastifikaci buněčných stěn dřeva, následovanou lisováním za tepla, poté chlazení a sušení v ustanoveném deformovaném tvaru a konečnou fixaci výsledného stavu. Lisování obvykle probíhá v radiálním směru dřeva mezi dvěma zahřátými korkovými deskami na požadovanou tloušťku. Největším problémem mechanicky zhuštěného dřeva je jeho tendence vracet se zpět do původního stavu, a to když je takto modifikované dřevo vystaveno vlhkosti (Kutnar a kol., 2007; Laine a kol., 2016; Senol a kol., 2016; Dömény a kol., 2018).



Obrázek 26: Stav před modifikací (vlevo), deformované buněčné stěny (vpravo) (Dömény a kol., 2018)

7.1.2 Zhušťované dřevo pro studené ohýbání

Zhušťované výrobky pro ohýbání za studena se vytváří podélným zhuštěním plastifikovaného dřeva a jeho následným ohýbáním do komplikovaných tvarů. Dřevo vstupující do prvotního procesu ve formě desek či hranolků plastifikace by nemělo vykazovat vady jako odklon vláken a suky. Dřevo je v dlouhém autoklávu napařeno párou pod tlakem. Plastifikované desky se poté umístí do lisovací komory, kde jsou stlačeny o 15 – 25 % původní délky. Dřevo se po vytažení z lisu přibližně vrací o 10 % do své původní délky. Takto zhuštěné dřevo je poté možno bez dalšího působení tepla ohýbat do velmi složitých tvarů v ohýbacích strojích nebo za pomoci přípravků. Když je dosaženo požadovaného tvaru, dřevo se vysuší pro konečnou fixaci svého tvaru. Pro výrobu se používají pečlivě vybrané listnaté dřeviny například javor, dub, třešeň, jilm, jasan nebo akát. Jehličnaté dřeviny se nepoužívají. Materiál je prodáván pod obchodním názvem Cold-Bend Hardwood™ firmou Pure Timber LLC v Gig Harboru, stát Washington, USA a je k dispozici v mnoha různých velikostech a rozměrech. Takřka stejný princip výroby používá italská firma Candidus Prugger Sas při výrobě materiálu Bendywood® o takřka stejných vlastnostech. Mechanické změny dřeva jsou u této technologie změněny minimálně, například pevnost v ohybu je nižší až o 10 %. Materiál se používá především na nábytek (Obr. 27), sochy, umělecké předměty, hudební nástroje nebo sportovní nářadí (Pure Timber LLC, 2021).



Obrázek 27: Lavička z produktu Cold-Bend Hardwood™ (Robert Dalheim, 2017)

8 Srovnání termické modifikace s ostatními modifikacemi dřeva

Kapitola se věnuje porovnání termické modifikace s nepoužívanějšími netermickými modifikacemi dřeva. Důraz je kladen především na vlastnosti produktů z jednotlivých modifikací dřeva s důrazem na jejich odolnost a trvanlivost v exteriéru. Protože se konečné vlastnosti termicky modifikovaných produktů v závislosti na použité technologii liší, všechny netermické metody budou porovnávány s nepoužívanější termickou metodou v Evropě - ThermoWood®.

Výrobky Accoya®Wood nachází hlavní použití podobného jako ThermoWood®, nicméně mohou být použity i na konstrukce nad zemí nebo v kontaktu s ní. V tom tkví výhoda oproti termicky modifikovanému dřevu. Produkty Accoya®Wood jsou dobře odolné vůči termitům, bílé a hnědé hnilobě. Mají o poznání lepší mechanické vlastnosti než termicky modifikované dřevo (Tab. 7). Výrobky Accoya®Wood spadají dle ČSN EN 350 (2019) (Tab. 2) do první, nejodolnější, třídy trvanlivosti, které dosahují tropické dřeviny jako teak nebo merbau. Chemicky modifikované dřevo lze tedy použít jako alternativu k tropickým dřevinám. Výrobky technologie ThermoWood®, Thermo-S a Thermo-D spadají dle ČSN EN 350 (2019) (Tab. 2) do třetí, respektive, druhé třídy trvanlivosti. Oproti ThermoWoodu® se chemicky modifikované dřevo dá v rámci tříd ohrožení ČSN EN 335 (2013) (Tab. 3) použít i pro velice náročné exteriérové expozice v rámci 4. a 5. třídy. Výrobky Thermo-S a Thermo-D dle ČSN EN 335 (2013) (Tab. 3) dosáhnou maximálně 3. třídy ohrožení. Thermo-S se hodí do nejvýše do 2. třídy, Thermo-D nejvýše do 3. třídy (Hill, 2006). Chemicky modifikované dřevo v porovnání s termicky modifikovaným dřevem vykazuje jenom malé barevné změny. Způsoby výroby včetně používání výrobků obou modifikací jsou šetrné k životnímu prostředí (Ibach, 2010; Mantanis, 2017).

Počáteční náklady výrobků Accoya®Wood jsou přibližně o 300% vyšší než jak je tomu u ThermoWoodu®, nicméně v poměru k jeho trvanlivosti/životnosti a nízké náročnosti následné údržby se počáteční investice vyplatí. Cena jednoho metru čtvereční terasového obkladu Accoya®Wood stojí na českém trhu 4035,- Kč s DPH, zatímco cena jednoho metru čtvereční výrobku stejného použití

z ThermoWoodu[®] na českém trhu stojí 985,- Kč s DPH (ASKO a.s., 2021; Artisan Dřevoprodej, 2021).

Tabulka 7: Srovnání vybraných aspektů chemické modifikace dřeva s termickou modifikací (Kebony AS, 2016)

Vlastnost	Furfurylace	Termická modifikace	Acetylace
Barva	hnědá, časem šedá	hnědá, časem šedá	bledá, trvalá
Mechanické parametry	zlepšená tuhost	pokles MOR, MOE	beze změny
Tvrдость	+++	+	++
Rozměrová stabilita	++	++	+++
Trvanlivost	+++	++	+++

Technologie Lignia[®] zlepšuje bio-odolnost a trvanlivost, tzn. dřevo může po modifikaci dosáhnout až první, nejodolnější třídy trvanlivosti vůči dřevokazným houbám dle ČSN EN 350 (Tab. 2), produkty technologie ThermoWood[®] spadají do druhé až třetí třídy. Technologie Lignia[®] spadá do 3. třídy ohrožení dle ČSN EN 335 (2013) (Tab. 3). Během nezávislých testů byla také prokázána zlepšená odolnost vůči termitům. Modifikační proces nijak nesnižuje mechanické vlastnosti oproti ThermoWoodu[®]. Produkt Lignia[®] Yacht disponuje navýšenou zárukou vůči dřevokazným houbám a hnilobě, dlouhou barevnou stálostí a nejvyšší 1. třídou ohrožení dle ČSN EN 335 (2013) (Tab. 3). Obdobně jako další chemické modifikace dřeva, technologie Lignia zabezpečuje dřevu vyšší odolnost a trvanlivost než ThermoWood[®], rovněž zde nedochází ke ztrátě mechanických vlastností. Produkty Lignia si také časem zachovávají původní barvu, na rozdíl od ThermoWoodu[®], během vystavením v exteriéru povětrnostním vlivům (Lignia, 2021).

Produkty Impreg a Compreg se při srovnání s termicky modifikovanými výrobky mohou díky své trvanlivosti a díky výborným mechanickým vlastnostem používat i na namáhané části strojů jako vrtulí u letadel nebo kryty hřídelí a ozubených kol. Rovněž mají oproti termicky modifikovaným výrobkům skvělé

tepelně a elektricky izolační vlastnosti. Díky tomu se mohou používat i pro rozvodní skříně, transformátory nebo pomocné prvky v hudebních přístrojích.

Mechanicky modifikované dřevo se vyznačuje značně vyšší hustotou než dřeva modifikovaná všemi technologickými metodami termické modifikace. Jak již bylo zmíněno, od hustoty se odvíjí mechanické vlastnosti dřeva, které má právě mechanicky modifikované dřevo lepší než ThermoWood®. Produkty Cold-Bend Hardwood™ a Bendywood® se používají v exteriéru pouze výjimečně a při použití v interiéru se moří nebo jsou lakovány. Mají stejné vlastnosti jako masivní, nemodifikované dřevo a mohou se používat se ve stejném prostředí. Jejich výhoda spočívá ve vytváření extrémních ohybů na interiérových prvcích (sochařství, designérství).

9 Závěr

Bakalářská práce se věnovala různým způsobům termické modifikace dřeva. Popisuje jednotlivé rozdíly v průběhu jednotlivých metod a vybrané aspekty výsledných produktů napříč metodami. Kromě toho se věnovala srovnání termické modifikace s ostatními metodami modifikace dřeva založených na chemické nebo na mechanické změně.

Termická modifikace způsobuje degradaci či změnu základních stavebních dřevních komponentů. Technologie termické modifikace jsou šetrné k životnímu prostředí, pracují s obnovitelnou přírodní surovinou. Hlavní výhody modifikovaného dřeva tkví ve snížení absorpce vody z okolního prostředí, zvýšení rozměrové stability nebo zlepšení bio-odolnosti. Hlavní nevýhody spočívají ve snížení mechanických vlastností (pevnost v ohybu, rázová houževnatost), poklesu tvrdosti a zvýšení křehkosti. Z poklesu mechanických vlastností a zvýšení křehkosti z důvodu chemických a fyzikálních změn pramení jeho konstrukční omezení pro použití na nosné konstrukce. Termicky modifikované dřevo se dále vyznačuje znatelně tmavší barvou, nižší hustotou nebo charakteristickou vůní. Ostatní, netermické modifikace dřeva nezhoršují jeho mechanické vlastnosti tak výrazně jako termická modifikace, ba naopak dokáží například mnohem více zlepšit jeho odolnost a trvanlivost při použití v exteriéru. V tomto směru je vhodné i zvážit ekonomické a ekologické aspekty výroby a následného použití.

Bakalářská práce může posloužit jako důležitý pramen informací z hlediska praxe při návrhu dřevěných konstrukcí, výrobě nových produktů, projektování různých exteriérových staveb nebo v otázce požadavků zákazníka na vybrané vlastnosti dřeva, které mohou být dosaženy konkrétní technologií. Práce také díky své úplnosti dokáže poskytnout východisko pro vytváření ucelených publikací o tomto tématu, přednášek resp. jako odrazový můstek pro další, podrobnější výzkum v oblasti termických a částečně i netermických modifikací.

10 Seznam použitých zdrojů

Accsys Technologies PLC. [2021-1-29]. Dostupné z: <https://www.accoya.com>

Archdaily. *Sneek Bridge / Achterbosch Architectuur with Onix*. 2011 [2021-2-1].

Dostupné z: <https://www.archdaily.com/184653/sneek-bridge-achterbosch-architectuur-with-onix>

Artisan Dřevoprodej s.r.o. [2021-2-28]. Dostupné z:

<https://www.artisan.cz/terasova-prkna-26x140x3900-thermo-borovice-povrch-jemna-drazka-kvalita-ab>

ASKO a.s. [2021-2-28]. Dostupné z: <https://www.drevar.cz/d/816212/ryhovana-prkna-accoya-25-x-190-x-4200-mm-jednostarnne-jemne-ryhovani>

BAZYAR, B. Decay Resistance and Physical Properties of Oil Heat Treated

Aspen Wood. *BioResources* 7(1), 2012, s. 696-705. [cit. 2020-11-10]. Dostupné z:

https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_07_1_0696_Bazyar_Decay_Resistance_Properties_Oil_Heat_Treated_Aspen

BOONSTRA, M. J. *A two-stage thermal modification of wood* [online]. Nancy:

Université Henri Poincaré, *Dissertation thesis*, 2008, 297 s. Dostupné z:

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748345/document>

BOONSTRA, M. J.; VAN ACKER, J.; TJEERDSMA, B. F.; KEGEL, E. V.

Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric

structural wood constituents [online]. *Annals of Forest Science* 64(7), 2007, s.

679-690. [cit. 2020-10-4]. Dostupné z: doi.org/10.1051/forest:2007048

CFP Woods. THERMOWOOD HANDBOOK [online], [2020-12-20]. Dostupné

z: <https://cfpwoods.com/wp-content/uploads/2020/02/CFP-Woods-Thermowood-Handbook-2020.pdf>

ČERMÁK, P. *Thermal Modification of Wood: Process and Properties*. Brno:

Mendelova univerzita v Brně. *Disertační práce*, 2013, 114 s.

ČSN EN 335 (2013). *Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva - Třídy použití: definice, aplikace na rostlé dřevo a na výrobky na bázi dřeva*. Praha: Český normalizační institut, 2013, 20 s.

ČSN EN 350 (2019). *Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva – Zkoušení a klasifikace odolnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva proti biologickým činitelům*. Praha: Český normalizační institut, 2019, 60 s.

DALHEIM, R. *Cold-Bend hardwood bends to desired shape* [online]. Woodworking Network, 2017 [2021-20-2]. Dostupné z: <https://www.woodworkingnetwork.com/technology/cold-bend-hardwood-bends-fix-desired-shape>

DÖMÉNY, J.; ČERMÁK, P.; KOIŠ, V.; TIPPNER, J.; ROUSEK, R. Density profile and microstructural analysis of densified beech wood (*Fagus sylvatica L.*) plasticized by microwave treatment [online]. *European Journal of Wood and Wood Products* 76(1), 2018, s. 105-111. [2021-2-22]. Dostupné z: doi.org/10.1007/s00107-017-1173-z

DUBEY, M. K. *Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiata pine wood after heat-treatment in a vegetable oil*. Canterbury: University of Canterbury, *Dissertation thesis*, 2010, 191 s. Dostupné z: doi.org/10.26021/2787

ESTEVEZ, B. M.; PEREIRA, H. M. Wood modification by heat treatment: A review [online]. *BioResources* 4(1), 2009, s. 370-404. [cit. 2020-10-4]. Dostupné z: doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404

Finská sauna - Horavia s.r.o. [2020-11-10]. Dostupné z: <https://www.sauna.cz/finska-sauna-auroom-libera-120x180-thermowood-osika>

GAŠPARÍK, M.; GAFF, M.; KAČÍK, F.; SIKORA, A. Color and Chemical Changes in Teak (*Tectona grandis L. f.*) and Meranti (*Shorea spp.*) Wood after Thermal Treatment [online]. *BioResources* 14(2), 2019, s. 2667-2683. [cit. 2021-3-9]. Dostupné z: doi.org/10.15376/biores.14.2.2667-2683

GURJAR, R. *Different Types of Industrial Timber* [online]. Medium, 2017 [2021-12-2]. Dostupné z: <https://medium.com/@rohitgurjar009/different-types-of-industrial-timber-4b4345329250>

HILL, C. *Wood Modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. 1. vyd. New Jersey: John Wiley & Sons, Ltd, 2006. 239 s. ISBN 978-0-470-02172-9

HOLWERDA, A. Podium Hoge Woerd [online]. [2021-12-2]. Dostupné z: <https://www.theaterkikker.nl/over-ons/meer-over-ons/podium-hoge-woerd/>

IBACH, R. E. Specialty Treatments: Chemical Modification. In *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 2010, s. 443. ISBN 9781523113460

International Thermowood Association. ThermoWood® Handbook [online]. Helsinki, 2003 [cit. 2020-10-28]. Dostupné z: https://asiakas.kotisivukone.com/files/en.thermowood.palvelee.fi/downloads/tw_handbook_080813.pdf

JEBRANE, M.; CUCCUI, I.; ALLEGRETTI, O.; JUNIOR, E. U. Thermowood® vs Termovuoto process-comparison of thermally modified timber in industrial conditions [online]. *The 9th European Conference on Wood Modification*, 17. – 18. 9. 2018, Arnhem, Netherlands [2020-12-4]. Dostupné z: <https://1url.cz/nKKRh%20%3e>

KANÁT, V. *Porovnání tepelně upraveného dřeva jedle a smrku z pohledu jeho užitkových vlastností*. Praha: Česká zemědělská univerzita, *Diplomová práce*, 2020, 68 s.

Kebony AS. Furfurylated Wood Modification: Beauty & Performance in Wood [online]. 2016 [2021-2-10]. Dostupné z: <https://res.aecdaily.com/res/a/567911/KN-EN-96401-1217.pdf>

KEGEL, E. Thermal modification of lesser-known wood species with the Hygrothermolytic FirmoLin® Process [online]. *8TH Hardwood Conference: Witch Special Focus On New Aspects Of Hardwood Utilization – From Science To*

Technology, 25. – 26. 10. 2018, Sopron, Hungary [2021-2-26]. Dostupné z: <http://users.teilar.gr/~mantanis/E-Kegel-presentation.pdf>

KEGEL, E.; WILLIAMS, W. Thermal modification of lesser-known wood species with the Hygrothermolytic FirmoLin® Process [online]. *8TH Hardwood Conference: Witch Special Focus On New Aspects Of Hadrwood Utilization – From Science To Technology*, 25. – 26. 10. 2018, Sopron, Hungary, s. 179-180, [2021-2-25]. Dostupné z: <https://1url.cz/uKKRl>

KEGEL, E; WILLIAMS, W. Wood modification in the Netherlands [online]. *Wood Modification in Europe: a state-of-art about processes, products and applications*. Firenze: Firenze University Press, 2019 [2021-2-25]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/287359631.pdf>

KOCAEFE, D.; PONCSAK, S.; BOLUK, Y. Effect of thermal threatment on the chemical composition and mechanical properties of birtch and aspen [online]. *BioResources* 3(2), 2008, s. 517-537. [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_03_2_Kocaeffe_P_B_ThermalTreatment_Birch_Aspen

KUBŠ, J. *Termicky modifikované dřevo (Thermowood), vliv nezávislých parametrů na závislé parametry při rovinném frézování*. Praha: Česká zemědělská univerzita, *Disertační práce*, 2019, 167 s.

KUČEROVÁ, V.; LAGAŇA, R.; VÝBOHOVÁ, E.; HÝROŠOVÁ, T. The Effect of Chemical Changes during Heat Treatment on the Color and Mechanical Properties of Fir Wood [online]. *BioResources* 11(4), 2016, s. 9079-9094 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: doi.org/10.15376/biores.11.4.9079-9094

KUTNAR, A.; SERNEK, M. Densification of wood [online]. *Zbornik gozdarstva in lesarstva* 82, 2007, s. 53-62. [2021-2-22]. Dostupné z: <http://eprints.gozdis.si/198/>

LAINE, K.; SEGERHOLM, K.; WALINDER, M.; RAUTKARI, L.; HUGHES, M. Wood densification and thermal modification: hardness, set-recovery and

micromorphology [online]. *Wood Science and Technology* 50(5), 2016, s. 883-894. [2021-2-22]. Dostupné z: doi.org/10.1007/s00226-016-0835-z

LIGNIA Wood Company Limited. [2021-2-22]. Dostupné z:

<https://www.lignia.com>

MANTANIS, G. I. Chemical Modification by Acetylation or Furfurylation: A Review of the Present Scaled-up Technologies [online]. *BioResources* 12(2), 2017, s. 4478-4489. [2021-1-29]. Dostupné z:

doi.org/10.15376/biores.12.2.Mantanis

MILITZ, H.; TJEERDSMA, B. Heat Treatment of Wood by The PLATO PROCESS. Review on Heat Treatments of Wood [online]. Antibes: [s. n.], 2001 [2020-10-30]. Dostupné z:

http://www.westwoodcorporation.com/worldwide/review_heat.pdf

NDZ Performance Inc. [2021-2-12]. Dostupné z:

<https://www.ndzperformance.com/Elk-Ridge-ER-148-Steel-Bolster-Fixed-Blade-Knife-p/elkridge-er148.htm>

Paged Trade Sp. z o.o. [2021-4-12]. Dostupné z: <https://pagedsklady.pl>

PASSAUER, L.; SCHUBERT, J.; SCHULZ, T.; FADE, P.; WEISS, B.; BUKHARDT, H. Artificial weathering of surfaces from laminated phenol-formaldehyde resin impregnated compressed wood: impact of top veneer type and overlay application [online]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2021 [2021-4-12]. Dostupné z: doi.org/10.1007/s00107-020-01648-0

Platowood B. V. [2020-11-6]. Dostupné z: <http://www.platowood.com>

Pure Timber LLC. [2021-2-23]. Dostupné z: <http://www.puretimber.com>

QIJUK Design Inovations Inc. [2020-11-10]. Dostupné z: <http://qijuk.com>

RAPP, A. O.; SAILER, M. Heat treatment of wood in Germany – state of art [online]. Hamburg, Germany: Federal Research Institute for Forestry and Wood

Management, 2000 [2020-11-7]. Dostupné z:

<http://www.thermallytreatedwood.com/Library/Technology/Germany.pdf>

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

REINPRECHT, L.; REPÁK, M. The Impact of Paraffin-Thermal Modification of Beech Wood on Its Biological, Physical and Mechanical Properties [online].

Forests 10(12), 2019. [2020-12-8]. Dostupné z: doi.org/10.3390/f10121102

RO&AD Architecten. Halsteren | Moses Bridge degli RO & AD. 2012 [2021-2-1]. Dostupné z: <https://www.viaggidiarchitettura.it/halsteren-moses-bridge-degli-ro-ad/>

RUNHAO, L.; LIU, X.; ZHANG, Y.; LIU, J.; GONG, C.; DONG, Y.; LI, J.; SHI, J.; WU, M. Paraffin Pickering Emulsion Stabilized with Nano-SiO₂ Designed for Wood Impregnation [online]. *Forests* 11(7), 2020. [2020-12-8]. Dostupné z: doi.org/10.3390/f11070726

SANDBERG, D.; KUTNAR, A.; MANTANIS, G. Wood modification technologies – a review [online]. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 10(6), 2017, s. 895-908. [2020-12-4]. Dostupné z: doi.org/10.3832/ifor2380-010

SENOL, S.; BUDAKCI, M. Mechanical Wood Modification Methods [online]. *Mugla Journal of Science and Technology* 2(2), 2016, s. 53-59. [2021-2-22]. Dostupné z: doi.org/10.22531/muglajsci.283619

WDE MASPELL SRL[®]. TV4NEWOOD PROJECT-DELIVERABLE D 4.5: Certification of products [online], [2020-12-12]. Dostupné z: http://www.tv4newood.it/public/documenti/D_4.5%20Product%20Certification.pdf

WILLIAMS, W. FIRMOLIN[®]: The mild way of thermal wood modification (updated version August 2014) [online]. Dresden: European TMT Workshop, 2014 [2021-2-22]. Dostupné z: <https://1url.cz/dKKRd>

Worth Point. Vintage Erco Laminated Wood & Brass Tipped Airplane Propeller.
[2021-2-8]. Dostupné z: <<https://www.worthpoint.com/worthopedia/vintage-erco-laminated-wood-brass-1920197766>>

WTT Service ApS. [2021-2-25]. Dostupné z: <[https://www. https://wtt.global](https://www.https://wtt.global)>