



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

INOVATIVNÍ MATERIÁLY NA BÁZI DŘEVA

INNOVATIVE WOOD-BASED MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vlastimil Buriánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Vlastimil Buriánek
Název	Inovativní materiály na bázi dřeva
Vedoucí práce	doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,
dr.h.c.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

1. Costa, M. A., Menezzi, C. H. S. Effect of thermo-mechanical treatment on properties of parica plywoods. Revista Árvore 2017:41(1)
2. Gáborík J, Joščák P, Kulík J, Grznárik T. Properties of compressed laminated beech wood by bending stress. Forestry and Wood Technology. 2011(74):63-8
3. Kamke, F. Laminated composites from densified wood. In: Bonding of modified wood. Proceedings of the 5th COST E34 international workshop, Bled, Slovenia. 2007
4. Neyses, B. Surface Densification of Solid Wood. Doctoral thesis, Lulea University of Technology 2019, ISSN 1402-1544
5. Sozen, E., Tankut, N., Tankut A.N. Determination of Shear Strength and Fire Performance of Plywood Supported by Woven E-Glass Fiber. Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology 3(2): 2016, ISSN: 3159-0040

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Bakalářská práce se bude zabývat návrhem kompozitního systému, který by našel uplatnění v oblasti vnějšího zesilování dřevěných prvků. Pro některé dřevěné stávající nosné konstrukce je vyžadováno využití dodatečných vyztužujících materiálů/elementů. Jedná se především o aplikace lokálního zesilování dřeva, např. v místech vykazujících namáhání v tlaku/tahu napříč vlákny dřeva, kde dřevo nevykazuje dostatečných parametrů. Pro tyto účely je poté obvyklou aplikací vnější zesilující systém pomocí FRP prvků (tyče, tkaniny, lamely).

V teoretické části práce je požadováno provést:

- a) rešerši možností výztužných FRP systémů pro aplikaci na dřevěné prvky, bude provedena analýza FRP sortimentu s ohledem na vyztužení dřeva či aglomerovaných materiálů na bázi dřeva.
- b) rešerši problematiky modifikačních postupů upravujících parametry dřeva, kdy různými druhy modifikací lze zvýšit jeho parametry, jako jsou objemová stálost, trvanlivost a pevnostní aspekty.

V praktické části práce autor provede:

- a) optimalizaci modifikačních procesů pro dosažení vyšších pevností a stabilizace dřeva.
- b) experimentální ověření vybraného typu úpravy (densifikace) na pevnostní parametry.
- c) experimentální ověření účinnosti vnějšího zesílení na modifikovaném dřevě/deskovém materiálu.

Rozsah práce cca 50 stran.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou optimalizace modifikačního postupu u dřevěných překližovaných desek. Optimalizace spočívá zejména ve vyhodnocení různých densifikačních způsobů s rozdílnými parametry plastifikace a stabilizace. Za hodnotící parametry byly zvoleny fyzikální parametry (objemová hmotnost, bobtnání, nasákavost) a pevnostní parametry (pevnost v ohybu, modul pružnosti) modifikovaných desek. Praktická část zahrnovala ověření dvou zhušťovacích úprav na březové překližce.

KLÍČOVÁ SLOVA

překližovaná deska, FRP kompozitní systémy, densifikace, plastifikace, stabilizace, termo-mechanická úprava, termo-hydro-mechanická úprava, kompresní poměr, spring-back, set-recovery, objemová hmotnost, bobtnání, nasákavost, pevnost v ohybu, modul pružnosti

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the issue of optimizing the modification process for plywood boards. Optimization consists mainly in evaluating different densification methods with different parameters of plasticization and stabilization. Physical parameters (bulk density, swelling, water absorption) and strength parameters (bending strength, modulus of elasticity) of modified plates were chosen for the evaluation parameters. The practical part involved the verification of two thickening treatments on birch plywood.

KEYWORDS

plywood, FRP composites system, densification, plasticization, stabilization, thermo-mechanical treatment, thermo-hydro-mechanical treatment, compression ratio, spring-back, set-recovery, bulk density, swelling, water absorption, bending strength, modulus of elasticity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Vlastimil Buriánek *Inovativní materiály na bázi dřeva*. Brno, 2022. 62 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Inovativní materiály na bázi dřeva* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 5. 2022

Vlastimil Buriánek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Inovativní materiály na bázi dřeva* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2022

Vlastimil Buriánek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, které se mi v průběhu zpracování práce dostávalo. Dále děkuji Ing. et Ing. Tomášovi Pipíškovi, Ph.D. za pomoc s realizací experimentální části. Poděkovat chci také Ing. Adamu Běťákovi za užitečné rady a výpomoc v laboratořích. V neposlední řadě děkuji i své rodině za podporu při studiu.

Obsah

1. Úvod	11
TEORETICKÁ ČÁST	12
2. Mikrostruktura dřeva	12
2.1. Jehličnaté dřevo	12
2.2. Listnaté dřevo	13
3. Výztužné FRP systémy	14
3.1. Základní vlastnosti	14
3.2. Pryskyřičná matrice	14
3.2.1. Nenasycené polyesterové pryskyřice	15
3.2.2. Vinylesterové pryskyřice	16
3.2.3. Epoxidové pryskyřice	16
3.2.4. Fenolické pryskyřice	16
3.3. Vyztužující vlákna	16
3.3.1. Skleněná vlákna	17
3.3.2. Uhlíková vlákna	18
3.3.3. Aramidová vlákna	18
3.3.4. Čedičová vlákna	19
3.4. Aplikace FRP výztuží na dřevěné prvky	20
3.4.1. Lepení	20
3.4.2. Typy vyztužení	20
4. Densifikace	22
4.1. Princip densifikace	22
4.2. Parametry densifikace	24
4.2.1. Kompresní poměr	24
4.2.2. Spring-back	24

4.2.3.	Set-recovery.....	24
4.3.	Metody densifikace dřeva	25
4.3.1.	Termo-mechanická úprava	25
4.3.2.	Termo-hydro-mechanická úprava.....	26
4.3.3.	Viskoelastická tepelná komprese	26
4.3.4.	Chemické metody	27
5.	Rešeršní poznatky způsobů densifikace dřeva	29
5.1.	Vliv zhušťovaných dýh na výsledné pevnostní vlastnosti překližované desky ze dřeva břízy a olše.....	29
5.2.	Vliv tepelně zhuštěných dýh na překližované panely z bukového dřeva	31
5.3.	Vliv částečně delignifikovaného zhuštěného dřeva na vlastnosti překližky.....	33
5.4.	Vliv semiizostatického zhušťování.....	35
	PRAKTICKÁ ČÁST	36
6.	Cíl práce.....	36
7.	Sestavení metodického postupu densifikace	37
7.1.	Etapa 1 – Návrh metodiky pro ověřování míry densifikace	37
7.1.1.	Specifikace metod densifikace	38
7.1.2.	Specifikace použitého lisovacího přístroje	38
7.1.3.	Specifikace etap densifikace.....	39
7.2.	Etapa 2 – Praktické ověření densifikace dřevěného prvku	40
7.2.1.	Specifikace použitých materiálů.....	40
7.2.2.	Příprava zkušebních těles	40
7.2.3.	Použité metody	43
8.	Výsledky zkoušek a jejich vyhodnocení	45
8.1.	Parametr densifikace	45
8.2.	Fyzikální vlastnosti densifikované překližované desky.....	45

8.2.1.	Objemová hmotnost a vlhkost	46
8.2.2.	Bobtnání a nasákavost	48
8.3.	Fyzikálně-mechanické vlastnosti	49
8.3.1.	Pevnost v ohybu	49
8.3.2.	Modul pružnosti v ohybu.....	50
9.	Závěr.....	52
	Seznam použité literatury	54
	Seznam použitých obrázků.....	60
	Seznam použitých tabulek	62

1. Úvod

Dřevo patří mezi jeden z nejstarších materiálů, které lidstvo dokáže využívat ve svůj prospěch. Nachází své uplatnění v celé řadě průmyslových odvětví. V oblasti stavebnictví zažívá poslední dobou velkou vlnu zájmu. Stavby zhotovované z dřevěných prvků jsou pro člověka pozoruhodnou volbou jednak z hlediska výsledného estetického výrazu dané konstrukce, jednak z důvodu samotných vlastností, které jsou velmi příznivé i při samotném faktu, že dřevo vykazuje relativně nízké objemové hmotnosti, ale také díky své přijatelné cenové dostupnosti a nízké ekologické náročnosti. Pozitivní vlastnosti jsou však kompenzovány skutečností, že dřevo velmi snadno podléhá rozličným fyzikálním (zejména vodě a teplotě) nebo chemickým vlivům. Tyto vlivy mění jeho vlastnosti zásadním způsobem, a proto je potřeba jim věnovat zvýšenou pozornost.

Rozvoj společnosti se přímo odráží mnohdy i na stavební materiály, u kterých pak dochází k větším důrazům na jejich požadavky. Často je také potřeba již stávající konstrukce opravit a dodatečně jim zvýšit únosnost. K tomuto účelu se začaly i v oblasti dřevařského stavebního průmyslu využívat vláknem vyztužené polymery – FRP výztuže.

Zvýšit parametry dřevěných prvků lze i jinými modifikacemi, kdy dojde k úmyslné změně jeho přirozených vlastností. Ty často korelují právě s objemovou hmotností, kterou dokážeme zvýšit lisováním (neboli densifikací) dřeva. Výhody lisovaného dřeva jsou známé několik desítek let. Zahuštěním dřeva dokážeme zvýšit jeho mechanické vlastnosti a mnohdy může výsledný materiál dosahovat značně lepších vlastností v porovnání s běžně používanými konstrukčními materiály.

TEORETICKÁ ČÁST

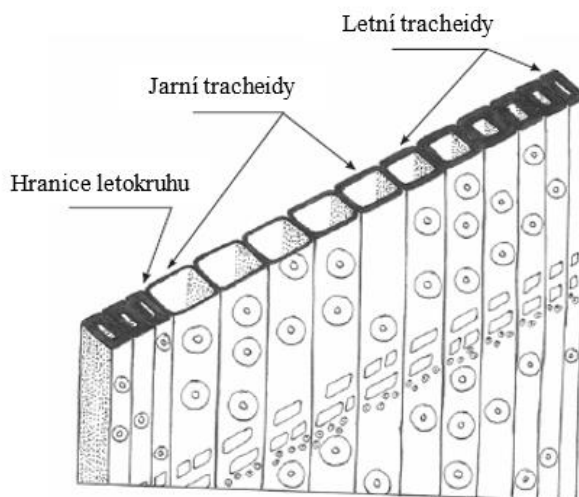
2. Mikrostruktura dřeva

2.1. Jehličnaté dřevo

Jehličnaté dřeviny, které jsou vývojově starší, mají jednodušší strukturu dřeva oproti dřevinám listnatým. Tu tvoří dva typy anatomických elementů – tracheidy (také cévice) a parenchymatické buňky [1].

Tracheidy jsou v jehličnatém dřevě rozmístěny až z 90 % jeho objemu [1] a skoro téměř vytváří sekundární dřevo. Jedná se o dlouhé vláknité uzavřené buňky se značně ztloustlou stěnou [2]. I když jsou to buňky uzavřené [1], plní ve dřevě funkci vodivou a mechanickou. Na svých stěnách mají různé typy teček nebo dvojteček. Tyto dvojtečky neboli ztenčeniny zajišťují látkovou výměnu se sousedními elementy dřevní stavby [2].

Jarní tracheidy, jež plní funkci trachejí a jsou tenkostěnné, vedou vodu společně s rozpuštěnými živinami z kořenů do asimilačních orgánů [1]. Mechanickou pevnost zajišťují tlustostěnné pozdní tracheidy. Velmi vzácně se v tracheidách jehličnatých dřevin mohou objevovat tenkostěnné útvary ucpávající cévy, tzv. thyly. Thyly jsou vychlípeniny parenchymatických buněk, které vyplňují staré nefungující cévy. Pozorovat je lze například u smrku, borovice a modřínu [2].



Obr. 1: Radiální uspořádání cévic v letokruhu [1]

Zbylých 10 % zaujímají buňky parenchymatické, které jsou tenkostěnné a dokonale uzavřené [1]. Zůstávají dlouho živé díky obsažené protoplazmě a zásobním látkám (škrob,

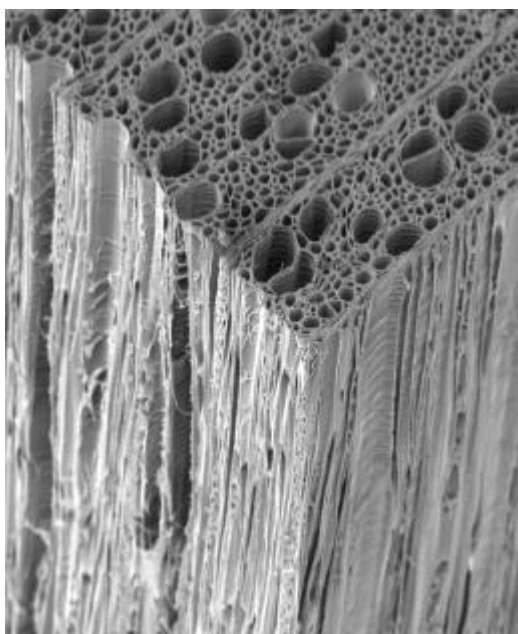
olej). U jehličnatých dřevin mohou navíc zahrnovat pryskyřice [2]. V radiálním směru vedou produkty asimilace z lýka a ve směru tangenciálním z paprsku do sousedních podélných pletiv přes jednoduché ztenčeniny [1]. V živém dřevě, kromě látkové výměny, plní i funkci zásobní. Naopak v jádře tyto buňky odumírají [2].

2.2. Listnaté dřevo

Listnaté dřevo se od dřeva jehličnatého výrazně liší. Struktura dřeva je složena z mnoha typů pletiv, které mají více specializovanou fyziologickou funkci [1].

Vodivou funkci zajišťují především buňky cév. Díky svému velkému průměru tak mohou dobře zabezpečit vedení vody s rozpuštěnými minerálními látkami ve směru axiálním. U některých listnatých dřevin jsou ve struktuře dřeva, kromě cév, i cévice, podporující transpirační tok v kmeni [1].

Libriformní vlákna, která jsou nejdelším pletivem v listnatém dřevě s řídce tečkovanými stěnami, mají ve dřevě funkci mechanickou [1] [2].



Obr. 2: Elektronový snímek mikroskopické struktury listnatého dřeva [1]

I u listnatého dřeva představují parenchymatické buňky hlavně zásobní funkci [1]. Jejich zastoupení je oproti jehličnatým dřevinám mnohem větší, to je způsobené vyšším podílem dřevního parenchymu [1] [2]. Mimo funkci zásobní jim připadá i funkce vodivá v radiálním směru [1].

3. Výztužné FRP systémy

Vláknem vyztužené polymery – kompozitní FRP výztuže (*Fiber Reinforced Polymer*) [3], nám ve stavebnictví pomáhají dodatečně zvýšit únosnost stávající konstrukce [4]. Tyto materiály kombinují vysoce pevná vlákna a pryskyřičnou matici. Díky svému vysokému poměru pevnosti k hmotnosti a jejich snadné manipulaci jsou již několik desetiletí používány zejména pro vyztužování betonových konstrukcí [5], a to nejen jako přímé vyztužení, kdy se FRP výztuž stane výztuží rozptýlenou v betonové směsi [4], ale i jako nepřímé vyztužení v podobě FRP lamel nebo výztužných tkanin. Jejich uplatnění se však čím dál více rozšiřuje i do oblasti dřevěných konstrukcí, například při opravách prvků s nedostatečnou únosností [5].

3.1. Základní vlastnosti

Pryskyřičná matrice, ve které jsou prostorově uspořádaná vlákna, plní funkci ochrany těchto vláken před mechanickým a chemickým porušením, udržuje je v požadovaném směru vůči namáhání a současně zprostředkovává přenos vnějších napětí do výztuže [4]. Vyztužující vlákna jsou ve výsledném kompozitu nositeli pevnosti a tuhosti. Naopak pryskyřice k pevnosti velmi nepřispívá. Princip tedy spočívá v rozdílných pevnostech a modulech pružnosti jednotlivých vláken, které mají tyto hodnoty oproti pojivu vyšší zhruba o jeden až dva řády, a při vnějším namáhání u nich nedojde k takové deformaci jako u polymeru. Pryskyřice má modul pružnosti v intervalu 2-6 GPa, zatímco u vláken dosahují hodnoty modulu pružnosti 70-900 GPa. I v případech pevnosti je rozdíl hodnot markantní. Pevnost pryskyřice dosáhne běžně hodnot 50-150 MPa, pevnosti vlákna většina výrobců udává v rozmezí 1-8 GPa. Docílením prostorově patřičného umístění skleněných, uhlíkových nebo organických vláken v pryskyřici dokážeme získat takový kompozitní materiál, který svými výslednými vlastnostmi převyšuje vlastnosti jednotlivých prvků [3].

3.2. Pryskyřičná matrice

Polymerní matrice je důležitou složkou FRP kompozitů, neboť jsou v ní uložená vlákna spojovaná do žádané struktury, chrání výztuž před možným povrchovým poškozením, v důsledku kterého by mohlo dojít k úplné ztrátě pevnosti celého kompozitu. Samotná vlákna by nešlo použít přímo, protože dosahují malých průřezových rozměrů [4].

Přenos vzniklého napětí z matrice do uložených vláken je vyvolán účinkem tahového namáhání. Styková plocha mezi těmito komponenty musí být natolik vyhovující, aby

k danému přenosu vůbec mohlo dojít [4]. Nejběžněji využívanými materiály matric jsou nenasycené polyestery (UP, z angl. „unsaturated polyester“), vinylestery (VE), epoxidy (EP) a fenolické pryskyřice, využívané zejména pro kompozity, kde je značně snižená hořlavost. Co do objemu celosvětového zpracovávání pryskyřic do vláknových kompozitů, se na prvním místě nachází nenasycené polyestery (75 %), 20 % pak tvoří vinylestery a zbylých 5 % připadá na pryskyřice speciální, kam patří i epoxidy a fenolické pryskyřice [3]. Rozdílné vlastnosti jednotlivých matric jsou shrnuty v následující tabulce.

Tab. 1: Vlastnosti nejčastěji používaných matric v systému FRP [3] [4]

Typ matrice	Hustota [g/cm ³]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Pevnost v tahu [MPa]
Polyestery (UP)	1,1-1,5	1,3-4,5	45-85
Vinylestery (VE)	1,15-1,35	3,0-3,5	73-81
Epoxidy (EP)	1,2-1,4	2,1-6,0	35-90
Fenolické pryskyřice	1,3	4,4	50-60

3.2.1. Nenasycené polyesterové pryskyřice

Bezbarvé až slabě nažloutlé roztoky lineárních nenasycených polyesterů v reaktivním rozpouštědle, nejčastěji styrenu. Během vytvrzování adhesiva, jenž nastává při normálních i zvýšených teplotách, se uvolňuje reakční teplo a dochází k objemovému smrštění až o 9 % [4] [6]. Reakce není doprovázena vznikem vedlejších těkavých produktů. Ačkoliv styren splňuje veškeré požadované podmínky rozpouštědla, mezi které patří: dobrá rozpouštěcí schopnost, dobrá kopolymerace mezi polyesterem a styrenem a hygienická nezávadnost, není rozpouštědlem ideálním. Jeho nevýhoda spočívá v těkavosti, hořlavosti a nepříjemném zápachu. Výsledný tuhý, zesíťovaný, nerozpustný produkt vzniklý radikálovou kopolymerací je běžně hořlavý. Z hlediska působení povětrnostních vlivů (UV záření, proměnlivé teploty, vlhkost, kyselé deště, aj.) mají nenasycené polyestery snahu zvyšovat svoji pevnost dovytvrzujícím efektem UV záření v prvních týdnech. Sluneční záření ale po určité době narušuje řetězce a pevnosti klesají. Sami o sobě jsou polyesterové pryskyřice křehké s náchylností na vznik mikrotrhlin a příznivě smáčí zevnějšek vláken [3].

3.2.2. Vinylesterové pryskyřice

Odolné pryskyřice, používané v agresivních chemických prostředích a pro náročně namáhané prvky, sdružující vlastnosti nenasycených polyesterových pryskyřic a epoxidových pryskyřic, jež jsou probrány níže. Přednost těchto lepidel hraje roli v oblastech použití tam, kde chceme zajistit větší houževnatost, menší výskyt mikrotrhlin, nenarušení vlastností v důsledku působícího agresivního prostředí a vysokoteplotní odolnost [4] [6].

3.2.3. Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice (zkráceně EP) neodštěpují vedlejší produkty, a tudíž nedochází k tak výraznému smrštění (pouze cca 2 %) během procesu vytvrzování. Jejich vlastnosti jsou natolik výborné, že patří mezi nejvíce využívané formy lepidel v konstrukcích. Nejen přilnavost, rozměrová stálost a kladné mechanické vlastnosti definují tyto pryskyřice. Za zmínku stojí i elektroizolační vlastnosti a odolnost v rámci různých chemických prostředí. Jen voda zhoršuje kýžený pozitivní efekt, neboť při vystavení EP vodě, dochází k navlhání a snížení teplotní odolnosti [3] [4].

3.2.4. Fenolické pryskyřice

Termosety s vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí, vznikající reakcí fenolu s formaldehydem s oblastmi použití závisující na typu metody v teplotním intervalu 150-210 °C. Tvoří podstatu lepidel pro laminování dřeva a překližek (64 % z celkové produkce fenoplastů). Termomechanická, povětrnostní a elektrická odolnost, díky které nenastává k výraznému poklesu mechanických vlastností v horizontu let, je velkým přínosem těchto pryskyřic [3].

3.3. Vytuzující vlákna

Vlákna, která používáme ve výrobě FRP výztuží jsou nejčastěji skleněného, uhlíkového, aramidového a čedičového charakteru. Důvodem je lineárně pružné chování při tahovém namáhání až do stavu porušení. V případě skleněných vláken pak hovoříme o GFRP – *glass fiber reinforced polymer*, u uhlíkových vláken jde o CFRP – *carbon fiber reinforced polymer*, pro aramidová vlákna jsou výztužné systémy označeny AFRP – *aramid fiber reinforced polymer* a FRP kompozity vyztužené čedičovými vlákny mají zkratku BFRP (z angl. *basalt fiber reinforce polymer*) [7]. Forma těchto vláken závisí na potřebách výrobců,

může se jednat o kontinuální vlákna (roving), nebo o výztuže ve formě tkané textilie či netkané rohože z dlouhých i sekaných vláken, případně kombinací obou těchto typů. Svazky obvykle s 200-400 vlákny tvoří pramence individuálních vláken, jež jsou z výroby navinuty na bubnech. Ty se pak využívají v oblasti tyčovin a tam, kde jeden z rozměrů převládá nad zbylými. Paralelně sdružené pramence již nazýváme roving. Obsah vláken je minimálně dvakrát tak vyšší (obvykle 400 až 1600 vláken). Jejich uplatnění souvisí s výrobou stříkaných laminátů, desek, trub, rohoží apod. Z nasekaných rovingů lze ihned získat, po naimpregnování pryskyřicí nebo termoplastem a tepelným slisováním, materiály zvané vyztužující rohože, které mají ve své finální podobě kvaziizotropní¹ vlastnosti [3]. V následující části jsou jednotlivá vlákna charakterizována.

3.3.1. Skleněná vlákna

Vláknová směs tvořená oxidem křemíku (Si) s příměsí oxidů hliníku (Al), vápníku (Ca), hořčíku (Mg) a boru (B) s nízkým obsahem oxidů alkalických zemin – sodíku a draslíku [7]. Tažená směs je v případě potřeby většího průměru vláken dosáhnuta dloužením vytékajícího skelného proudu z trysek [4]. Jejich náchylnost k dotvarování (přírůstku deformace při konstantním zatížení) a neočekávanému přetržení je velkou nevýhodou těchto vláken, společně s problematikou působení alkalického prostředí, citlivosti na vlhkost a pH, kvůli kterému ztrácí tahové pevnosti. Mimo to jsou však skleněná vlákna výbornými izolanty, z hlediska tepelné i elektrické energie, pyšníci se tahovými vlastnostmi a finančně nejvýhodnější variantou [7].



Obr. 3: Skleněná vlákna ve formě dlouhého rovingu (nalevo) a tkané textilie (napravo) [8]

¹ v makroskopickém měřítku je možné kompozity považovat za materiály izotropní, mikroskopicky se jedná o materiál anizotropní

3.3.2. Uhlíková vlákna

Vlastnosti uhlíkových vláken ubezpečují jejich použití do prostředí extrémně exponovaných aplikací, jako jsou předpjaté konstrukce anebo konstrukční zesilování při sanaci. Působením vnějšího zatížení se vlákna začínají chovat pružně, a to do doby porušení, kdy nastane selhání „křehkým“ způsobem. Vynikající mechanické vlastnosti, objemová stálost, odolnost proti působení vysokých teplot a elektrická/tepelná nevodivost jsou kompenzovány jejich vysokou pořizovací cenou [7].

Výroba vláken představuje tepelný rozklad polyakrylonitrilu (zkráceně PAN) za vzniku uhlíkových nebo grafitových vláken. Obdobným způsobem lze využít i mezofázové smoly, viskózu nebo fenolaldehydové prekurzory. Prvním stupněm výroby je stabilizace při teplotách 220 až 300 °C, během které dojde k cyklizaci vazeb v řetězci makromolekuly a zesílení kyslíkových můstků. Následuje karbonizace v teplotním intervalu 1000 až 1500 °C v prostředí čistého dusíku (inertní prostředí). V této části dojde ve vláknech k odstranění vodíku a snížení obsahu dusíku a kyslíku. Před závěrečným nanesením povrchové úpravy proběhne grafitizace (od 1800 do 3000 °C) vedoucí ke zvýšení obsahu uhlíku a zvětšení tuhosti vláken [7].



Obr. 4: Uhlíková CFRP vlákna [9]

3.3.3. Aramidová vlákna

Syntetický polymer aramidových vláken (AFRP) obsahuje dlouhé fenylové kruhy, které jsou spojeny navzájem amidovými skupinami (CO-NH) [7]. Tyto skupiny tvoří silnou vazbu, která je odolná vůči rozpouštědlům a teple. Klasifikace probíhá na základě pevnosti v tahu, kterou mají pětikrát větší oproti oceli a dvakrát tak vyšší než skleněné vlákno [4]. Vlákná poskytují pohodlnou a prospěšnou techniku pro zpevnění struktur a mají znatelné

výhody, zejména pokud jde o odolnost proti ohni a teple a propustnost par. AFRP také zlepšuje odolnost konstrukčních prvků proti korozi a zpomaluje vyboulení [10]. Komerčním názvem, pod kterým lze koupit tyto vlákna, je produkt Kevlar, jenž je tvořen poly-para-fenyltereftalamidem. Vlákna typu Kevlar 49 a Kevlar 149 firmy Du Pont je možné používat v oblasti leteckého a zbrojního průmyslu v souvislosti s jejich vysokou teplotou měknutí (520 °C) a vysokým modulem pružnosti v tahu [7].



Obr. 5: Příklad kevlarového krátkého vlákna (nalevo) a tkaniny z aramidových vláken (napravo) [11] [12]

3.3.4. Čedičová vlákna

Jedná se o jednosložkové kompozity vzniklé lávovým tavením s následným procesem rozvláknění vzniklé taveniny do podoby obrovských fibril. Vlákna mají vysokou pevnost a tepelnou odolnost. Díky jejich charakteru snadné recyklovatelnosti jsou také respektující k zákonitostem životního prostředí. Teplota tání vláken dosahuje hodnoty 1450 °C, což umožňuje aplikace u konstrukcí vyžadujících požární odolnost. Nelze neopomenout vysokou chemickou odolnost s celou řadou prostředí nebo účinnou kompatibilitu s mnoha typy polymerních matric [4].



Obr. 6: Ukázka tyčí na bázi čedičových vláken (BFRP) [13]

3.4. Aplikace FRP výztuží na dřevěné prvky

FRP výztuže lze pro vyztužování stavebních konstrukcí používat ve formě lamel, či výztužných tkanin, nebo jako výztužné tyče, s jednosměrně orientovanými vlákny s matricí epoxidové pryskyřice, do monolitických betonových konstrukcí se nejběžněji setkáváme s rozptýlenou výztuží plnicí funkci vnitřní výztuže [4]. Lepení vláknem vyztužených plastů (FRP) lepidly na dřevěné konstrukce za účelem opravy a zpevnění má mnoho výhod, které jsou spojeny s vyššími poměry pevnosti a tuhosti k hmotnosti daného materiálu, stejně tak jako odolnosti proti povětrnostním vlivům [5]. Lepidlo je hlavním činitelem pro správné fungování systému FRP-dřevo, a proto je potřeba provádět jeho výběr a aplikaci s velikou pečlivostí [14]. Pro konstrukční vyztužení dřevěného prvku se obecně používají dvě hlavní formy FRP výztuží: pultrudované tyče nebo lamely a tkaniny. Spojením tyčí do předem připravených drážek v konstrukci získáváme vnitřní vyztužení prvku. Pro vnější se využívá FRP desky nebo látkového materiálu [5]. Integrita vazby mezi FRP a dřevěným podkladem byla v minulosti důkladně studována, za účelem popsání chování vazby, způsobu porušení a rozložení vnitřních napětí [5] [14].

3.4.1. Lepení

Vyztužování dřeva FRP se provádí lepením zvoleného typu na povrch namáhané konstrukce nebo uložení do předem připravených drážek [5]. Jako upevňující pomůcka FRP výztuže ve drážce může mimo pryskyřice posloužit i cementová zálivka [4]. Nejvhodnější variantou používaných lepidel při aplikacích FRP výztuží byly zavedeny epoxidové pryskyřice, které dokážou kvalitně vyplňovat mezery dřevěného prvku [14], vykazují nízkého smrštění při vytvrzování [5] a sami vyžadují nízké upínací tlaky [14]. Pro vazbu lepidla se dřevem je důležitá i samotná viskozita lepidla a jeho polarita [15], stejně tak, jako pečlivá příprava povrchu. Laxním přístupem by nemusela být dosažena dobrá pevnost spoje a jeho trvanlivost. Výsledný lepený povrch je náchylný k poškození, způsobený změnou vlhkosti a s tím souvisejícími rozměrovými změnami [5].

3.4.2. Typy vyztužení

Lamely

Lamely se aplikují pro dodatečné zesílení stropních konstrukcí, snížení průhybu, při opravách nosných prvků, nebo změnách statického systému. Jejich nízká hmotnost nevyžaduje příliš namáhavé manipulace, a proto se snadno lepí na povrch konstrukce. Ten

musí mít patřičnou úpravu získanou pemrlováním nebo otryskáním [16]. Nejběžněji dostupnými materiály, ze kterých se vyrábějí FRP lamely jsou uhlíková vlákna v epoxidové pryskyřici, s procentuálním zastoupením nejméně 70 % objemu kompozitu [4].

Tkaniny

FRP tkaniny jsou často z jednostranně nebo oboustranně orientovaných vláken bez polymerní složky. Vlákná jsou převážně uhlíkového, skleněného, čedičového nebo aramidového charakteru. Jelikož mají tkaniny vysokou pevnost v tahu a dobře odolávají vlivu vlhkosti, dokážou si zachovat své původní rozměry. Této vlastnosti se využívá při sanacích konstrukcí [4] nebo u dodatečného zesilování namáhaných prvků [7]. Polymerní matrice je do systému vháněna až samotnou aplikací na konstrukční část, kdy dojde ke kontaktu použitého lepidla a tkaniny. Lepidlo, upevňující tkaninu na povrchu, začne prosakovat i do samotné struktury vláken [4]. Na výsledné tuhosti vyztužovaného prvku se odráží typ použitých vláken a samotná tloušťka tkaniny. Vysoké hodnoty únosnosti vyztuženého prvku lze získat aplikacemi silnějších CFRP a GFRP tkanin [17].

Tyče

Posledním typem, jak zpevnit dřevěné prvky, které jsou namáhané ohybem nebo smykem, je využití FRP kompozitů ve formě tyčí. Ty se zpravidla vkládají do předem připravených drážek anebo otvorů, nacházejících se v blízkosti povrchu [18]. Aby se docílilo kýženého efektu v rámci, kterého byla FRP kompozitní tyč do prvku přidána, je potřeba drážku/otvor vyplnit polymerní matricí. Ta po vytvrzení vytváří kolem tyče ochranné prostředí. Díky tomu je systém odolný proti zvýšeným teplotám, UV záření a mechanickému poškození. Navíc plní celkový estetický dojem vyztuženého prvku [4] [18].

4. Densifikace

Dřevo má oproti jiným výrobním a konstrukčním materiálům jedinečné vlastnosti, z nichž některé jsou výhodné, jiné nevýhodné. Na jedné straně má vynikající poměr pevnosti a hmotnosti, nízký dopad na životní prostředí, nízkou tepelnou difuzivitu, díky čemuž je příjemné na dotek a organický vzhled, který je obecně považován za atraktivní vlastnost. Na druhé straně se však potácí s řadou nedostatků, většinou souvisejících s přirozenou interakcí dřevo-voda. Zlepšení těchto vlastností lze dosáhnout změnou jeho objemové hmotnosti. Existuje totiž vzájemná korelace mezi objemovou hmotností dřeva a jeho mechanickými vlastnostmi [19] [20].

Základním způsobem, kterým lze dosáhnout lepších vlastností přírodního dřeva, je modifikace lisováním, označované také jako zhuštění, případně densifikace. Zhuštěné dřevo tak získá vyšší pevnost, tvrdost a rázovou houževnatost v ohybu [20] [21] [22]. Své uplatnění potom nachází tam, kde se požaduje velká objemová hmotnost a vysoké mechanické vlastnosti. Navíc lze takto upravit dřeviny s nízkou objemovou hmotností a komerčně nezajímavé dřeviny na vysoce výkonné a vysoce hodnotné produkty. Konkrétními příklady použití mohou být: výroba ložiskových pouzder, brzdících špalíků, částí nábytku, parket, oblast hudebních nástrojů apod [19].

4.1. Princip densifikace

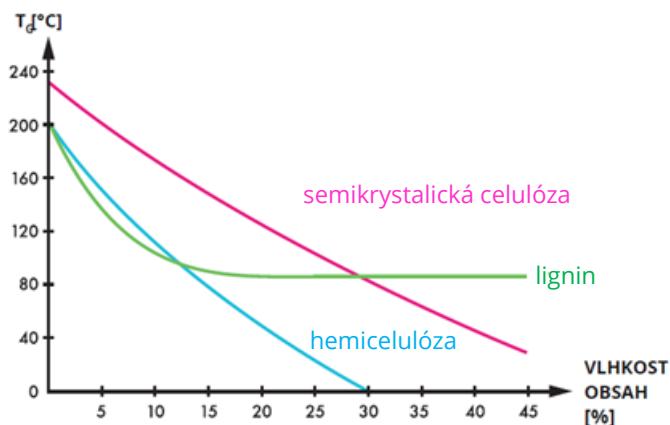
Technika densifikace dřeva pomocí komprese vyžaduje čtyři kroky:

1. změkčení nebo plastifikace buněčné stěny,
2. stlačení v příčném směru ve změkčeném stavu,
3. tuhnutí ochlazením a vysušením v deformovaném stavu,
4. fixace/stabilizace deformovaného stavu [21] [23].

Obecně je možné densifikovat dřevo v různých směrech, ať už podélně nebo příčně. Příčné zhuštění je dále děleno v radiálním a tangenciálním směru [21].

Během procesu zhuštění může dojít k velkému rozdrčení buněk dřeva a dehonestaci vzorku. Tomuto stavu je zabráněno díky plastifikaci dřevní struktury, kdy se matrice hemicelulóza-lignin nachází v gumovitém stavu. Často je plastifikace o kombinaci tepla a vlhkosti. Zvýšením teploty totiž dochází ke změně vlastností ligninu [22] [24]. Interakce mezi teplotou skelného přechodu (T_G), která charakterizuje chování amorfních látek dřeva

(v případě teploty amorfních polymerů blíží se teplotě T_G , tuhost materiálu významně klesá [25]) a vlhkostními podmínkami je základním procesem zhušťování dřeva. Při zvýšeném obsahu vlhkosti dojde ke snížení teploty měknutí amorfních látek dřeva. Tento stav je znázorněn na Obr. 7 [21].



Obr. 7: Teplota skelného přechodu (T_G) tří základních složek dřeva jako funkce obsahu vlhkosti [21] [24]

Po plastifikaci bývá dřevo vystaveno působení tlaku, díky kterému se dřevěné buňky deformují pod zatížením. Tlak nemusí zpravidla dosahovat příliš vysokých hodnot (řádově jde o jednotky MPa). Otevřením lisu po ukončení doby stlačení může ve zkoušeném vzorku nastat okamžité pružné odpružení. Abychom tomuto kroku předešli a získali kvalitní densifikovaný výrobek, je potřeba stanovit určitou formu stabilizace (např. přidáním chladicího stupně do navrženého procesu densifikace). Materiál je v lise během chladicího stupně stále pod zátěží, aby došlo k zabezpečení stabilizace výsledné zhuštěné struktury [21].

Na základě mnoha zkoušek bylo zjištěno, že dřevo reaguje odlišně na radiální a tangenciální kompresi zejména kvůli svému anizotropnímu charakteru. V radiální kompresi dominuje, v poslední fázi konsolidace, elastická deformace vrstvy letního (pozdního) dřeva, zatímco v tangenciálním směru začíná konečná fáze po přizpůsobení této vrstvy vybočením. Navíc se buňky jarního dřeva deformují snadněji než buňky dřeva letního [21].

4.2. Parametry densifikace

4.2.1. Kompresní poměr

Míru aplikovaného zhuštění surového dřeva lze zjistit na základě kompresního poměru (CR, z *angl. Compression Ratio*), který se vypočítá z počáteční a konečné tloušťky dřeva, která musí být změřena bezprostředně po stavu uvolnění lisu. Výsledný kompresní poměr udávaný v procentech lze získat dosazením změřených tloušťek do následujícího vzorce:

$$CR = \left(\frac{t_i - t_f}{t_i} \right) \cdot 100 \text{ [%]} \quad (1)$$

kde: t_i je počáteční tloušťka čerstvého dřeva v mm,

t_f je konečná tloušťka odebraná bezprostředně po uvolnění lisu v mm [21] [23] [24].

4.2.2. Spring-back

Když je lis po procesu zhuštění otevřen, dochází k určitému odpružení v důsledku elastických deformací během zhušťovacího kroku. Zhuštěné dřevo je schopno obnovit svůj původní tvar i po velké deformaci, zejména při vystavení vysoké vlhkosti a teplotě. Vykazuje dva typy rozměrové nestability:

1. bobtnání dřeva způsobené hygroskopickou povahou dřeva,
2. nevratnou rozměrovou nestabilitu v důsledku uvolňování vnitřních pnutí uložených ve dřevě během zhušťování [21] [22].

Okamžité zpětné odpružení, které vzniká, se označuje jako spring-back (SB), může nabývat hodnot od 0 % do 100 % [21] a je dáno vztahem:

$$SB = \left[\frac{(t_f - t_t)}{t_t} \right] \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

kde: t_f je konečná tloušťka odebraná bezprostředně po uvolnění lisu v mm,

t_t je cílová tloušťka po zhuštění udávaná v mm [24].

4.2.3. Set-recovery

Ochlazením plastifikovaného dřeva po zhuštění se upraví obsah vlhkosti ve dřevě tak, aby byl vhodný pro následné použití. Jestliže teplota klesne pod příslušnou teplotu skelného přechodu ligninu, hemicelulózy a semikrystalické celulózy, dojde ke snížení molekulární aktivační energie a k umožnění tvorby Van der Waalsových a vodíkových vazeb. Tímto způsobem je pak pružně deformovaná krystalická celulóza fixována plasticky

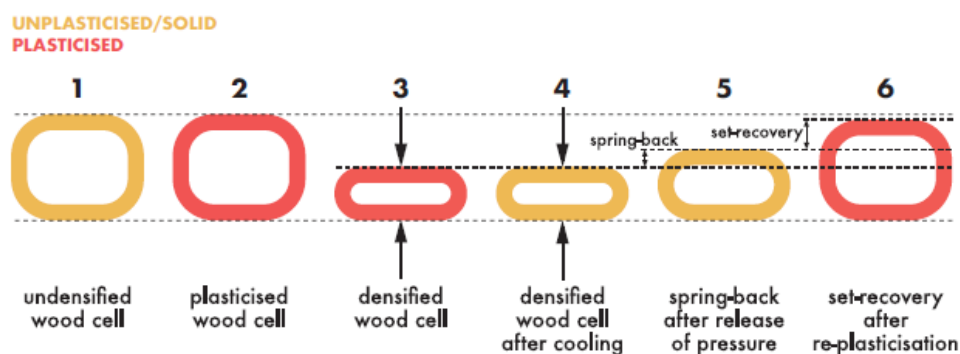
deformovaným ligninem, hemicelulózou a semikrystalickou celulózu. Takto vzniklý stav, tzv. zamrzlý, je nestabilní. Při vystavení dřeva další formy plastifikace, ke které dojde bez vnějších sil, např. vlhkostí nebo zvýšenou teplotou, se vrátí dřevo do původních rozměrů, díky uvolnění pružné deformace krystalické celulózy. Jakmile se dřevěné buňky zotaví, změna vlastností způsobená zhuštěním se ztratí [21], což v podstatě činí celý přístup densifikace zbytečným. V praxi se zhuštěné dřevo úplně nezotaví [23].

Proces zotavení je definován:

$$SR = \left[\frac{(t_n - t_f)}{t_n} \right] \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

kde: t_n je tloušťka zhuštěného dřevěného materiálu po použití a replastifikaci v mm,

t_f je konečná tloušťka odebraná bezprostředně po uvolnění lisu v mm [24].



Obr. 8: Znáznornění zpětného odpružení (*spring-back*) a zotavení (*set-recovery*) v řezu dřevěné buňky, žlutá barva značí neplastifikované dřevo, červená naopak dřevo plastifikované, šipkami je znázorněno působení zatížení [21]

4.3. Metody densifikace dřeva

V horizontu posledních 30 let vyšla řada studií, které měly za cíl prozkoumávat různé přístupy ke zhušťování dřeva. Nejvíce se výzkumné skupiny zabíraly termo-mechanickými (zkráceně TM) a termo-hydro-mechanickými úpravami (THM), což vedlo k posunu v celé oblasti densifikace a zkoumání těchto procesů při působení mnoha různých parametrů. Mimo to je v následující části probrána viskoelastické tepelné komprese a jsou krátce představeni zástupci z řad chemických metod [21].

4.3.1. Termo-mechanická úprava

Tepelné zpracování má za následek mírnou úpravu struktury dřevěného materiálu a tím zlepšuje jeho vlastnosti. Termo-mechanická modifikace je technika, která kombinuje tepelné zpracování s mechanickým stlačením aplikovaného kolmo na vlákna, kdy se všechny stupně

provádějí za podmínek otevřeného systému bez kontroly okolní relativní vlhkosti [26] [27]. Správná kombinace doby lisování, teploty a tlaku vede ke zvýšení objemové hmotnosti dřeva. Zvýšení tlaku přímo souvisí se zvýšením kompresního poměru a ovlivňuje tím zhuštění výsledného kompozitu. Popsaná metoda zajišťuje i snížení rovnovážného obsahu vlhkosti, který klesá se zvyšující se teplotou zhuštění. Vysvětlením je snížení pórovitosti dřeva po procesu zhuštění a snížení hygroskopičnosti v důsledku tepelné degradace hemicelulóz, složek nejvíce citlivých na teplo [21] [28].

4.3.2. Thermo-hydro-mechanická úprava

Zhuštěný dřevěný vzorek má tendenci, vlivem vystavení vysoké teploty anebo tlaku, ireverzibilně bobtnat a zajistit si neúplnou rozměrovou stabilitu a snížení mechanických vlastností. Ztrátu vnitřního napětí, díky které dochází k tomuto stavu, lze zajistit přidáním do procesu zhuštění prostředí vodní páry. Proces termo-hydro-mechanického (dále jen THM) zhušťování dřeva tak kombinuje tři základní média: teplo, sytou páru a tlak v uzavřeném systému. THM se sestává ze čtyř následujících kroků:

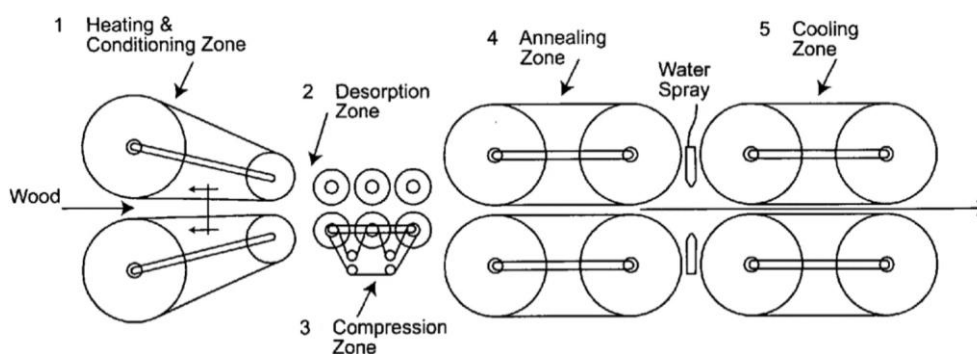
1. plastifikace, zahřátí vzorku na zvýšenou teplotu za podmínek nasycené páry,
2. zhuštění dřevěného komponentu za stejných podmínek páry uzavřením lisu,
3. zvyšování teploty a udržování stejných podmínek bez změny polohy lisu,
4. ochlazování vzorku a následné otevření lisu [22].

Zvýšená odolnost dřeva proti oděru a tvrdost povrchu, dosáhnutá vlivem THM úpravy, má za následek zajímavé aplikace dřeva s nízkou objemovou hmotností, jako jsou stolní desky a podlahy, kde se tradičně spíše objevují druhy tvrdého dřeva [22] [29].

4.3.3. Viskoelastická tepelná komprese

Metoda podobná THM, jelikož využívá stejných kombinací tepla, páry a tlaku, vedoucích ke zhuštění dřeva [30], avšak během prvního kroku dojde ke stavu překročení dřeva jeho teploty skelného přechodu za zvýšeného působení teploty a vlhkosti, načež dojde k plastifikaci vyvolané rychlou dekompresí par a odstranění vázané vody v buněčné stěně [31]. Krok dekomprese páry je rozhodujícím faktorem pro celkovou plastifikaci dřevěné struktury spoléhající na rychlém pohybu vody z buněčné stěny. Teploty, které přesáhnou teplotu skelného přechodu v kombinaci s rychlou dekompresí páry a odstraněním vody v buněčné stěně, změkčují molekuly dřeva a zabraňují křehkým lomům. Výsledný materiál

dosáhne vyšší pevnosti, tuhosti a snížené hygroscopicity. Viskoelastická tepelná komprese i přes všechny pozitiva nezlepšuje náchylnost k bobtnání při navlhčení a nemění odolnost vůči mikrobiálnímu napadení. Jednou z možných metod ochrany se nabízí impregnace pryskyřicí nebo olejem, například fenol-formaldehydové pryskyřice dodávají dřevu požadovanou odolnost proti rozkladu [24]. Mnoho autorů zabývajících se metodou viskoelastické tepelné komprese (zkráceně VTC) následovalo kroky Fredericka Kamkeho (kterému, společně s jeho výzkumnou skupinou, za metodu viskoelastické tepelné komprese udělil Úřad pro patenty a ochranné známky Spojených států amerických patent), aby tak prohloubili získané znalosti o této metodě. Skupina slovinských vědeckých pracovníků například zvolila zcela odlišný přístup k dosažení zhušťovaného povrchu. Jejich experiment spočíval v použití třecího svařovacího stroje, kam umístili dva kusy dřeva, oddělené vrstvou slunečnicového oleje k zamezení slepení povrchů, který vyvolal teplo a přispěl tak k změkčení dřevěného povrchu. Poté byl aplikován dodatečný tlak, který působil do doby, kdy se dřevo neochladilo pod 100 °C. Tvrdost výsledného kompozitu dosáhla až dvojnásobných hodnot [21].



Obr. 9: Patentové zařízení pro kontinuální zhušťování metodou VTC (1 - oblast zahřívání a kondicionování, 2 - zóna měknutí dřeva rychlou dekompresí par, 3 - oblast komprese, 4 - oblast žihání pro podporu tepelné degradace a relaxace, 5 - zóna chlazení) [24]

4.3.4. Chemické metody

Snížit set-recovery zhuštěného dřeva a zlepšit tak mechanické vlastnosti je možné díky impregnaci dřeva použitím chemikálií [23] [24]. Ve výsledku jde o stav, kdy polymerní složky dřeva, kterými jsou lignin, hemicelulóza nebo celulóza, reagují s činidly za vzniku stabilní kovalentní vazby. Použitím chemikálií ve dřevě zlepšuje rozměrovou stálost, odolnost i samotnou životnost dřeva. Impregnace se tak vzájemně s procesem zhuštění doplňuje. Mezi zástupci chemikálií používaných k impregnaci řadíme anhydrid kyseliny octové, fenol-formaldehydové pryskyřice a melanin-formaldehyd [24].

Anhydrid kyseliny octové

Reakce anhydridu kyseliny octové se složkami dřeva vede k esterifikaci hydroxylových skupin dostupných v buněčné stěně za vzniku kyseliny octové. Výsledný produkt má vysokou rozměrovou stabilitu v důsledku snížení hygroskopičnosti, vysokou tvrdost a zvýšenou odolnost proti vzniku plísní. Nedochází však k žádnému markantnímu zvýšení mechanických vlastností [23] [24].

Fenol-formaldehyd (PF)

Impregnací použitím fenol-formaldehydových (dále jen PF) pryskyřic dochází ke zlepšení rozměrové stálosti a odolnosti proti smrštění a bobtnání [23] [24]. Výrazně se tak snižuje spring-back dřeva po úplném vytvrzení pryskyřice. PF pryskyřice proniká během procesu impregnace do struktury buněčné stěny a blokuje pohyb vody v kapilárách. Kombinací PF pryskyřic a komprese docílíme zlepšení objemové hmotnosti, pevnosti, tvrdosti a snížení parametru set-recovery zhuštěného dřeva [24].

Melanin-formaldehyd (MF)

Vysoká koncentrace dostupné pryskyřice vyžaduje ředění za účelem zvýšení odolnosti vůči vodě a pronikání do dřevěné buněčné stěny. Oproti PF pryskyřicím dokáže melanin-formaldehydové pryskyřice zlepšit například odolnost vůči povětrnostním vlivům a rozměrovou stabilitu [23] [24].

5. Rešeršní poznatky způsobů densifikace dřeva

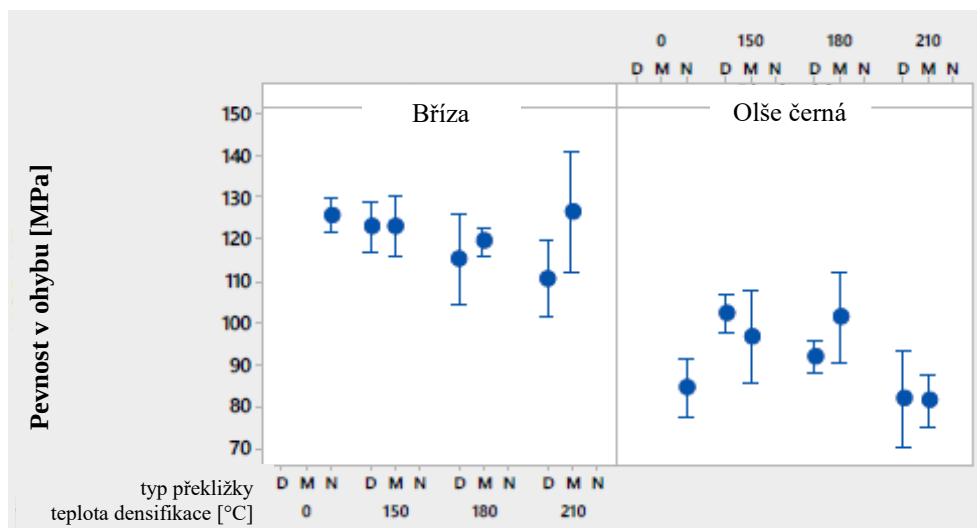
Mechanické parametry dřeva z většiny případů korelují s jeho objemovou hmotností. Zvýšením objemové hmotnosti zlepšujeme mechanické vlastnosti a zlepšuje se i tvrdost dřeva. Pro vytvoření zlepšených produktů je proto snaha vyvinout vhodný postup procesu zhušťování dřeva. S tímto procesem však souvisí i problém týkající se stabilizace výsledné zhuštěné dřevní struktury a zabránění tak efektu odpružení. Mnoho studií, které se zabývaly plastifikací dřeva a eliminací efektu odpružení a vedly ke zlepšeným produktům, jsou popsány v následující kapitole [25].

5.1. Vliv zhušťovaných dýh na výsledné pevnostní vlastnosti překližované desky ze dřeva břízy a olše

V rámci studie [32] zkoumající vlastnosti překližek vyráběných ze zhuštěných dýh (dále jen typ D), nezhuštěných dýh (dále jen typ N) a střídavých vrstev těchto dýh s a bez zhuštění (dále jen typ M), s použitím malého množství lepidla v závislosti na teplotě zhuštění a druhu dřeva, byly použity dýhy z břízy a olše černé původem z Ukrajiny v tloušťce 1,5 mm a obsahu vlhkosti 7,4 %. Na třech vyrobených pětivrstvých překližkách, tvořených dýhami orientovanými vždy kolmo vrstvu po vrstvě, prokládanými nátěrem z močovino-formaldehydové pryskyřice (dále jen UF pryskyřice), který se lišil v závislosti na typu překližky – pro překližky typu D se nanasla UF pryskyřice v množství 60 g/m², překližky typu N byly natřeny v množství 80 g/m² a překližky typu M v množství 70 g/m² – se sledovaly zejména pevnost v ohybu a modul pružnosti.

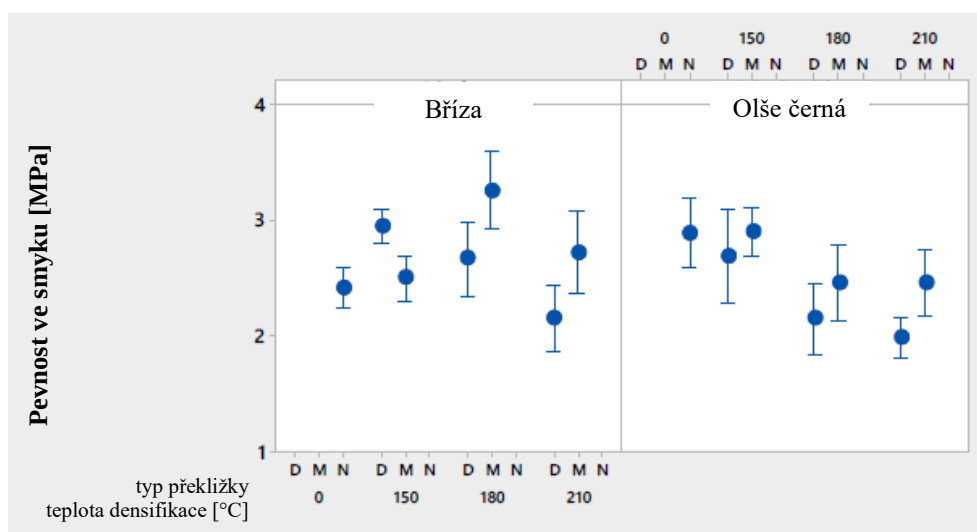
Pro tyto experimenty byly vzorky vystaveny tlaku 2 MPa po dobu 3 minut při třech teplotních stavech – 150 °C, 180 °C a 210 °C.

Výsledky studie [32] ukázaly, že **hodnoty objemové hmotnosti jsou pro všechny kategorie překližky vyrobené z březových dýh vyšší než hodnoty pro překližované desky z černé olše**. To samé platí i pro hodnoty pevnosti v ohybu, patrné na Obr. 10. Byl potvrzen i fakt, že se zvyšující se objemovou hmotností se hodnota pevnosti zvyšuje.



Obr. 10: Intervalový graf pevnosti v ohybu pro překližky z břízy a olše černé [32]

Oslabení pevnosti v ohybu u překližek typu D způsobilo zhuštění dých aplikované před výrobou. Nejlepší teplotou, pro zabezpečení kvality spojení jednotlivých dých, se dosáhlo při teplotních úrovních 150 °C a 180 °C. Vyšší teplota nezpůsobila lepší smykovou pevnost ve srovnání s překližkami typu N. Nejvyšší smykovou pevnost se podařilo dosáhnout při zhušťovací teplotě 150 °C, to je možné pozorovat na Obr. 11.



Obr. 11: Intervalový graf pevnosti ve smyku pro překližky z břízy a olše černé [32]

Všechny hodnoty pevnosti ve smyku byly u vytvořených panelů nad limitní hodnotou 1 MPa, kterou stanovuje norma EN 314-2.

Výsledky ohybových vlastností tak potvrdily postupné snižování hodnot pevnosti v ohybu a modulu pružnosti pro jednotlivé typy překližek za zvýšené teploty zhušťování. Uplatnění **zhušťování dých při teplotě 150 °C poskytuje nejlepší výsledky** z hlediska

ohybových vlastností a dobré kvality spoje překližovaných panelů typu D a M **při současné nízké spotřebě lepidla**, přibližně 60 a 80 g/m² [32].

5.2. Vliv tepelně zhuštěných dýh na překližované panely z bukového dřeva

Mnoho studií, hodnotících vliv tloušťky dýhy na překližované/LVL panely, zjistilo, že mechanická pevnost překližovaných panelů se snižuje s rostoucí tloušťkou dýhy díky průměrné hloubce kontrol soustruhu. Kontroly soustruhu mají obrovský význam, ovlivňují mimo jiné i spotřebu lepidla při výrobě panelu [33].

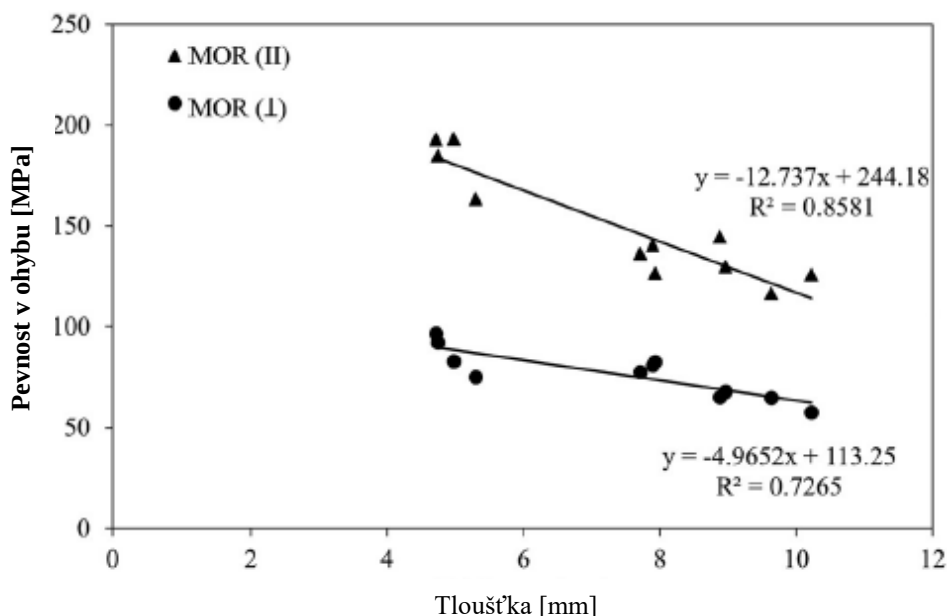
Překližka a vrstvené dřevo (LVL) jsou nyní dobře známé jako vysoce výkonné konstrukční dřevěné výrobky pro stavebnictví [34] [33]. Současným trendem je výroba materiálů ze dřeva s použitím menšího množství lepidla (šetrnějších k životnímu prostředí). Navíc je výhodné navrhnout takové produkty, u kterých docílíme menší rychlosti rozprostření lepidla. Termomechanické zhuštění umožňuje snížit rychlost šíření lepidla bez ztráty pevnosti spoje až o 40 % [35] [36].

Překližované pětivrstvé panely, které byly použity v rámci této studie, byly podobné jako v případě studie v kapitole 5.1. Z rotačně řezaného bukového dřeva byly získány dýhy o rozměrech 350×350 mm. Za použití UF lepidla nanášeného válečkovým aplikátorem v množství 180 a 110 g/m² došlo k jejich lepení navzájem kolmo na sebe. Následně byly stlačeny řízeným lisem. Při dosažení tlaku 2,7 MPa byly dýhy stlačeny v příčném směru při teplotě 180 °C po dobu 3 minut. Před otevřením lisu došlo k ochlazení na teplotu 20 °C a relativní vlhkost 65 %. Překližky byly následně lisovány za teploty 130 °C po dobu 5,5 min [33].

Podle očekávání **se drsnost povrchu dýhy zlepšila díky tepelnému stlačení**. Hodnoty tloušťky překližky u všech typů panelů byly nižší než přípustná hodnota dle EN 315, ta by měla být v rozmezí 5,66–7,24 mm a 11,72–13,68 mm pro použitou tenkou a silnou dýhu, a nepřekračovaly tolerance pro nebroušené panely podle této normy. Největší úbytek tloušťky je způsoben zvýšením přitlačného tlaku.

Tloušťka překližovaných panelů ovlivňuje lineárním charakterem pevnost v ohybu (MOR). Tento vztah je vyjádřen na Obr. 12, kdy **hodnoty MOR klesají s rostoucí tloušťkou vzorků překližky**. To je v souladu s údaji jiných autorů [37], kteří také zjistili snížení pevnosti v ohybu v důsledku zvyšující se tloušťky panelu. Naopak **s rostoucí**

objemovou hmotností roste i pevnost v ohybu. Vztahy mezi objemovou hmotností a pevností v ohybu překližkových panelů jsou složitější, protože pevnost překližky nezávisí pouze na objemové hmotnosti, ale také na tloušťce dýhy použité v lícových vrstvách, typu a množství naneseného lepidla, poměru stlačení/zhutnění panelu atd [33].



Obr. 12: Vztah mezi pevností v ohybu (MOR) a tloušťkou překližkových panelů [33]

Snížením lepidla o 40 % nedošlo ve většině případů **ke snížení pevnosti v ohybu.** Výjimku tvořily panely vyrobené z tenké zhuštěné dýhy. Použití **silnějších** bukových dýh **vede ke zhoršení pevnosti v ohybu** překližkových panelů [33] [37]. Poruchy se při ohybových zkouškách vyskytovaly většinou v povrchových vrstvách tahové zóny nebo po celé tloušťce vzorku. V určité konfiguraci, a zejména při použití tenkých a silných dýh, by mohlo být výhodné použít tenkou dýhu pro lícní (vnější) vrstvy a silnější dýhu pro vnitřní vrstvy překližky [33].



Obr. 13: Zlomeniny vzorků překližky při zkoušce pevnosti v ohybu [33]

Pevnosti ve smyku překližky vyrobené s použitím tepelně lisovaných dýh byly vyšší než pevnosti získané s použitím nezhuštěných dýh. Překližky vyrobené ze zhuštěných dýh s použitím menšího množství lepidla (110 g/m^2) vykazovaly podstatně vyšší hodnoty pevnosti ve smyku než u vzorků překližky vyrobených ze zhuštěných nebo nezhuštěných dýh s použitím vyššího množství lepidla (180 g/m^2). Na druhou stranu **překližky vyrobené z nezhuštěných dýh vykazovaly v rámci studie [33] lepší rozměrovou stabilitu.**

Panely vyrobené ze zhuštěných dýh s menším množstvím lepidla nabobtnají méně než panely vyrobené ze stejných dýh, pouze s vyšším obsahem lepidla. A panely, které tvořily nezhuštěné dýhy a menší podíl lepidla, nabobtnají více než panely vyrobené ze zhuštěných dýh se stejným množstvím lepidla. **Zvýšení množství lepidla zabraňuje pronikání vody do panelů a tím snižuje absorpci vody.**

Použití **vysokého tlaku při lisování překližky je nevhodné**, protože vede ke zhoršení kvality povrchu překližky, ke ztrátě tloušťky a hmotnosti překližky a následně k nadměrné spotřebě surovin. Také **oslabuje pevnost v ohybu a zhoršuje povrchovou tvrdost překližky**. Proto je hlavním úkolem při výrobě překližky dosáhnout požadovaného ohybového a lepeného výkonu při minimalizaci ztráty tloušťky panelu a zabránění nadměrnému zhuštění panelu [33].

5.3. Vliv částečně delignifikovaného zhuštěného dřeva na vlastnosti překližky

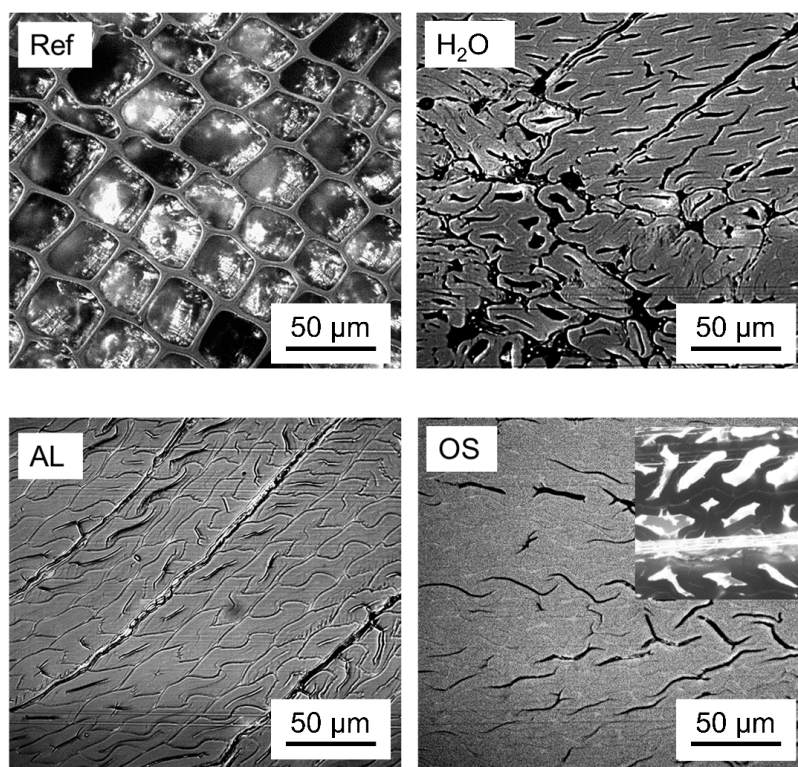
Dostupné literatury [38] naznačují, že extrakce amorfních polymerů má za následek obohacení volných hydroxylových skupin na celulóзовé mikrofibrily, které mohou vytvářet další inter a intramolekulární vodíkové vazby, díky kterým lze dosáhnout zvýšení mechanických vlastností.

Na univerzitě přírodních zdrojů a biologických věd v Rakousku tak došlo k průzkumu [38] dvou delignifikačních protokolů smrkových dýh, které byly následně použity pro výrobu překližky. V prvním procesu došlo k namočení vzorků do směsi ethanolu a deionizované vody (dále jen DI) v poměru 2:1, dokud se neutopili. Pak byly ponořeny do směsi ethanolu a DI obsahující 1,5 % kyseliny octové, ve stejném poměru (2:1) a umístěny do tlakového reaktoru. Delignifikace byla prováděna při teplotě 170°C a tlaku 14 baru po dobu 180 minut. Zahřívací doba byla 75 minut a doba chlazení 120 minut.

Pro druhý případ bylo použité alkalické prostředí, kdy se vzorky primárně impregnovaly v DI, dokud se neutopily. K urychlení bylo použito vakuum. Poté byly vzorky vloženy do vodného roztoku ze směsi siřičitanu sodného a hydroxidu sodného. Pomocí vodní lázně došlo k udržování teploty 98,5 °C po dobu 240 minut při atmosférickém tlaku. Aby nedošlo k nadměrnému oparování reakčního roztoku, byla na nádoby umístěna skleněná víčka.

Po delignifikaci byly vzorky zahuštěny v hydraulickém horkém lisu při teplotě 120 °C během 15 minut a maximálním tlaku 20 MPa, který byl udržován přes noc při teplotě místnosti. Nakonec byly zhuštěné vzorky uloženy v klimatizační komoře udržované při 20 °C a 65 % relativní vlhkosti. Z takto připravených dých byly vytvořeny vzorky překližek, které byly potažené 400 g/m² fenol-resorcinol-formaldehydovým lepidlem.

Autoři výzkumu [38] dospěli k závěrům, že **delignifikační postupy vedly k různým ztrátám sušiny**, ale k dosti podobnému obsahu ligninu. Zhuštění vedlo k **rozsáhlému zhroucení buněčné stěny** v celé oblasti pozdního dřeva.



Obr. 14: Snímky z elektronového mikroskopu zobrazující zhroucení raného dřeva neošetřených referenčních vzorků (Ref), zhuštěných po napuštění vodou (H₂O), zhuštěných po alkalické delignifikaci (AL) a zhuštěných po organosolvové delignifikaci (OS) [38].

Podobné zvýšení tuhosti, jako tomu bylo dosaženo v rámci této studie, získali i autoři Freyem a kol. **Velmi účinná delignifikace a zhušťování různých druhů dřeva vedou k rekordnímu zlepšení mechanického výkonu.** To navíc převyšuje čisté škálování

zvyšujících se parametrů v důsledku zvyšující se objemové hmotnosti [39]. Předpokládá se, že zvýšení pevnosti má za následek další tvorba vodíkových vazeb umožněná extrakcí ligninu [40]. Překližky vyrobené v této studii [39] mají stejnou povahu chování jako řada víceosých kompozitů. I delignifikované překližky však vykazují **určité slabé stránky**, zejména v oblasti pevnosti ve smyku.

5.4. Vliv semiizostatického zhušťování

Proces CaLignum, kdy je dřevo stlačováno v lisu Quintus (používaného mimo jiné pro tváření plechů) pod pružnou pryžovou membránou naplněnou olejem, je metoda pro semiizostatické zhušťování dřeva. Tato metoda umožňuje vyšší deformaci struktur s nízkou objemovou hmotností [21]. Zatěžování probíhá pod tlakem 130 MPa po dobu 2 minut. Ihned poté je tlak snížen na atmosférický. Komprese probíhá při 20 °C a obsahu vlhkosti dřeva mezi 5 a 15 %. Cílem studie bylo zjistit, jak se mění pevnostní vlastnosti takto zhuštěného dřeva a zda se nějak liší od vzorků nezhuštěných [41].

Pevnosti v tlaku se na vybraných vzorcích výrazně nelišily. V rámci pevnosti v ohybu měly vyšší hodnoty pevnosti vzorky nezhuštěné. **Vliv objemové hmotnosti byl patrný i na tvrdost podle Brinella**. Tvrdost zhuštěných vzorků odpovídala tvrdosti nezhuštěných o 100-200 kg/m³. **Zvýšená objemová hmotnost tedy podporuje pevnostní vlastnosti**, ale dřevo je při zhuštění více či méně negativně ovlivněno. K největšímu zlepšení pevností, díky procesu semiizostatického zhuštění, dochází u dřeva s původní vysokou objemovou hmotností [41].

Proces CaLignum měl největší potenciál, jelikož dostal podporu i ze strany průmyslu a objevil se na trhu. Technologii získala firma Tarkett Company ve Francii, která začala v roce 2011 vyrábět zhuštěný eukalyptový podlahový produkt. Nedlouho na to však výrobek stáhla z trhu, zřejmě kvůli nejasným informacím o stavu zotavení a vysokým procesním nákladům [21].

PRAKTICKÁ ČÁST

6. Cíl práce

Náplň teoretické části této bakalářské práce spočívala v provedení analýzy modifikačních FRP systémů, které lze využít pro posílení konstrukce či prvku z aglomerovaných materiálů na bázi dřeva a k průzkumu možnosti modifikovat dřevěné materiály způsobem zvaným densifikace. Následně byla provedena rešerše vědeckých studií zabývajících se densifikací dřevěných materiálů, zejména v oblasti překližovaných desek. Popsán byl vliv na výsledné mechanické parametry překližovaných desek a na základě jednotlivých dosažených výsledků se dospělo k závěru, zda byla příslušná metoda efektivní.

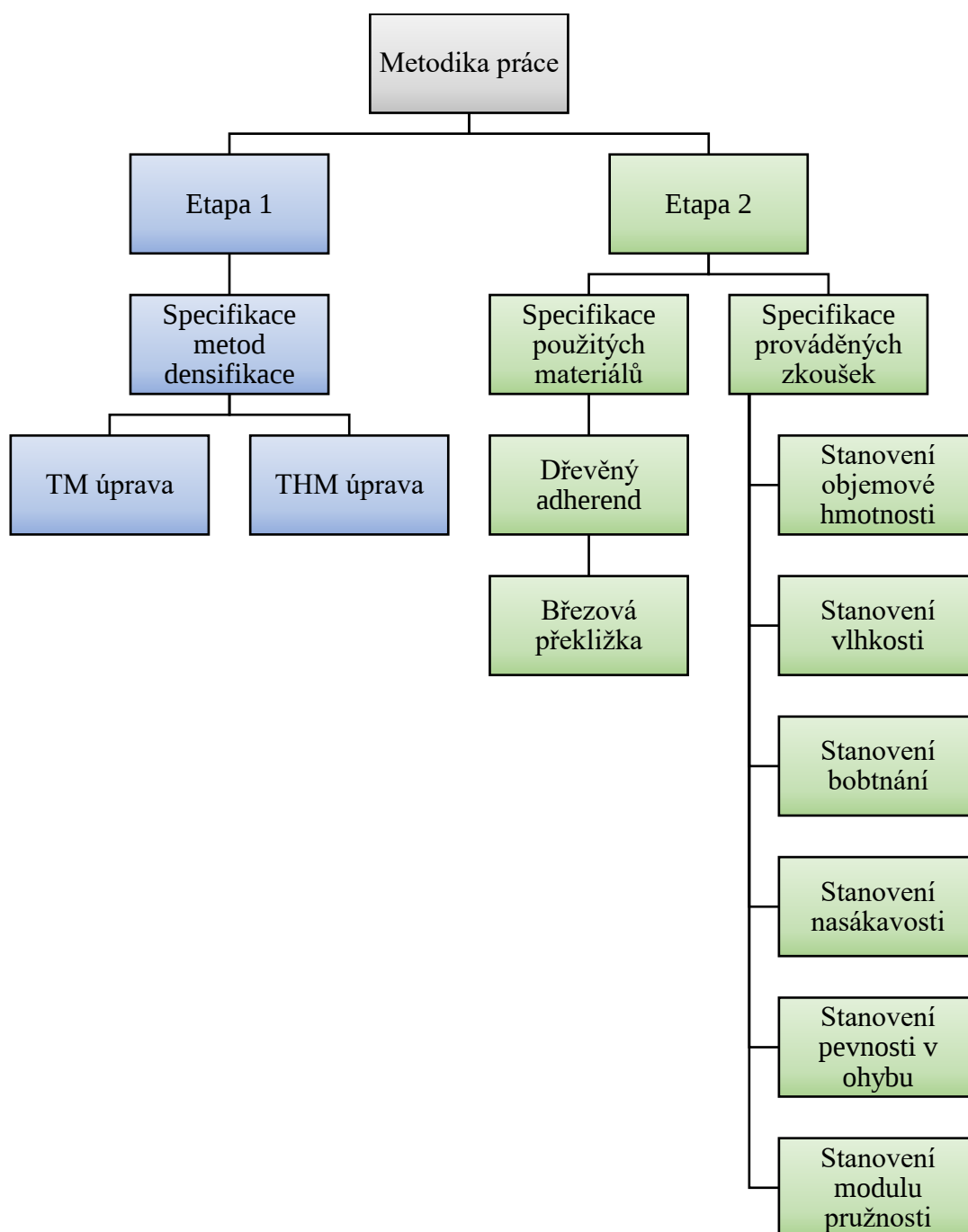
V experimentální části bude posuzován vliv zvolených způsobů densifikace na vlastnosti překližovaných desek z březového dřeva a bude ověřena míra účinnosti těchto postupů úpravy. Jednotlivé postupy se budou lišit metodou zhuštění, bude aplikována různá plastifikace dřevní struktury a forma stabilizace po stlačeném stavu.

Výsledkem experimentu bude vyhodnocení základních parametrů překližované desky v závislosti na zvoleném způsobu densifikace. Pozornost bude soustředěna na změnu objemové hmotnosti a na pevnostní parametry. Poznatky z této práce mohou být dále využity k rozšíření znalostí v oblastech termo-mechanické a termo-hydro-mechanické metody densifikace.

7. Sestavení metodického postupu densifikace

7.1. Etapa 1 – Návrh metodiky pro ověřování míry densifikace

V následujícím schématu rozděleného do dvou etap je popsána metodika práce. Nejprve došlo k výběru metod densifikace a jejich bližšímu popisu. Dále následuje praktické ověření vybraných metod společně s charakteristikou použitých materiálů a prováděných zkoušek pro zjišťování základních fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností vybrané překližované desky po provedené modifikaci.



7.1.1. Specifikace metod densifikace

Pro experimenty byly vybrány dvě metody zhušťovacích úprav překližovaného deskového materiálu, a to: i) termo-hydro-mechanická (THM) a ii) termo-mechanická metoda (TM). Tyto metody byly zvoleny v návaznosti na rešeršní poznatky a srovnávány s referenční variantou (REF) překližované desky, u které nedošlo k žádné formě densifikace. Samotný proces densifikace deskového materiálu proběhl ve výzkumném centru Josefa Ressela v Brně – Útěchově, které je nedílnou součástí Ústavu nauky o dřevě LDF Mendelu. Veškeré kroky modifikace deskového materiálu (plastifikace, stlačení a stabilizace) a jejich bližší specifikace jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 2.

Tab. 2: Kombinace dílčích kroků procesu densifikace deskového materiálu

Metoda	Označen í desky	Plastifikace	Stlačení	Stabilizace	
THM	A1B1C1	Vlhkost 90 %, teplota 30°C po dobu 2 týdnů	3 MPa/180 °C pod dobu 10 min	180 °C, 5 hodin v lise	následné odtížení
	A1B1C2				chlazení 16 hodin pod zátěží v lise
TM	A2B1C1	Termická při teplotě 180 °C po dobu 10 minut			následné odtížení
	A2B1C2				chlazení 16 hodin pod zátěží v lise

7.1.2. Specifikace použitého lisovacího přístroje

Pracoviště v Útěchově disponuje jednoetážovým hydraulickým lisem typu HL 400, navrženým a vyrobeným firmou STROZATECH s.r.o., Brno. Hydraulika přístroje je tvořena čtyřmi hydraulickými válci průměru 200 mm vyvozuující manometrický tlak, které stlačují topné desky lisu velikosti 1300×1200×40 mm s možností vyvolat v těchto deskách teploty v intervalu 90-220 °C. V tabulce Tab. 3 je uvedena podrobnější specifikace.

Tab. 3: Technické parametry hydraulického lisu HL 400

Velikost topných desek	1300×1200×40 mm
Teplota topných desek	90-220 °C
Specifický tlak na ploše 1200×1000 mm	3,35 MPa
Celková lisovací síla	4 020 kN
Uzavírací pracovní rychlost	12,5 mm/s

7.1.3. Specifikace etap densifikace

A) Plastifikace deskového materiálu

Pro účely ověření vlivu plastifikace vstupního deskového materiálu byly navrženy a provedeny dva rozdílné postupy: *hydrotermická mechanická úprava* (dále jen THM) a *termická mechanická úprava* (dále jen TM). THM úprava spočívala ve dvou týdenní expozici zkušebních překližovaných desek (625×400 mm) prostředí o relativní vlhkosti 90 % a teplotě 30 °C umístěním v klimatizační komoře (typ CTS) umístěné ve vědeckovýzkumném centru AdMaS Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. V průběhu expozice byla u desek zjišťována hmotnost pro bližší specifikaci vlhkosti daného materiálu. Proces TM spočíval v expozici desek již přehřátým tlačným deskám lisu (180 °C) po dobu 10 minut. Pro vyloučení procesu delaminace vlivem vysoké vstupní vlhkosti bylo použito nerezové mřížkové síto se speciálním úpletem, který umožnil odvod páry z deskového materiálu během procesu stlačení (Obr. 15).

B) Stlačení deskového materiálu

Pro oba typy THM a TM úprav došlo ke stejnému způsobu stlačení plastifikovaných desek působením lisovacího tlaku 3 MPa vyvolaným hydraulickým lisem po dobu 10 minut.



Obr. 15: Ukázka způsobu stlačení: vlevo systém nerezové síto a březová překližka, vpravo je zachycen proces stlačení s pohledem mezi topné desky lisu

C) Stabilizace deskového materiálu

Po procesu stlačení následovala 5 hodinová stabilizace deskového materiálu v lise při stejné teplotě (180 °C) pro oba typy úprav (THM a TM). Po této době bylo přistoupeno ke dvěma způsobům stabilizace, a to stabilizace při teplotě 180°C po dobu 5 hodin; a stabilizace při teplotě 180°C po dobu 5 hodin a následném 16 hodinovém chlazení při zatížení desky.

7.2. Etapa 2 – Praktické ověření densifikace dřevěného prvku

7.2.1. Specifikace použitých materiálů

Dřevěný adherend – březová překližovaná deska

Zkušební vzorky byly vyrobeny z překližované desky březového dřeva. Obecně lze o překližovaných deskách říct, že jejich využití nabývá velkého významu zejména díky vysokým pevnostem, houževnatosti, pružnosti za nízkých objemových hmotností a tvarové stabilitě.

Březová překližovaná deska byla vybraná 7-vrstvá, surová. Jednalo se o velkoplošný materiál, který byl tvořený svazkem dýh různé kvality navzájem orientovaných o 90° a slepených fenol-formaldehydovou pryskyřicí. Březová překližovaná deska byla dodána o rozměru 1250×2500 mm a v tloušťce 9 mm, jakost CP/CP (deska s vyspravenou plochou) a třída lepení 3 (AW 100), což umožňuje její aplikaci pro nechráněné venkovní prostředí. Dle specifikace výrobce se jedná o zdravotně nezávadný materiál, vyhovující třídě úniku formaldehydu A (E1) dle ČSN EN 1084:1997 stanoveným metodou plynové analýzy.

Tab. 4: Vlastnosti březové překližky udávané výrobcem

Tloušťka		9 mm
Počet vrstev		7
Orientační objemová hmotnost		700 kg/m ³
Pevnost v ohybu² (směr vláken povrchové dýhy)	podélná	53,1 N/mm ²
	příčná	32,9 N/mm ²
Tloušťková tolerance		+0,5/-0,2 mm

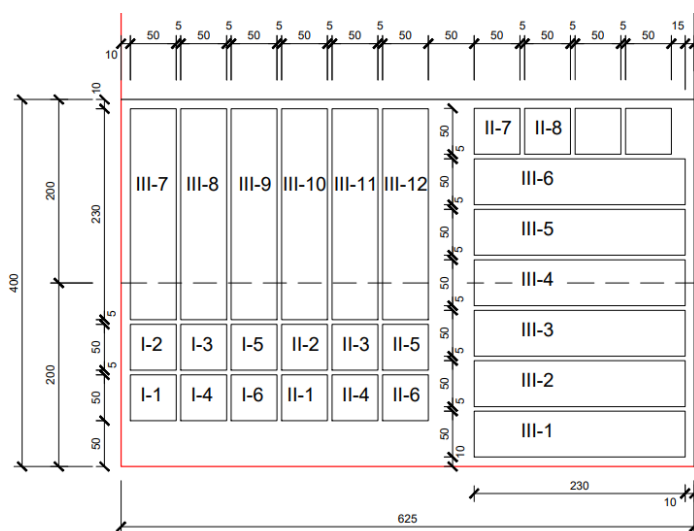
7.2.2. Příprava zkušebních těles

Z panelu březové překližky bylo vyřezáno pět desek s rozměry 625×400 mm, z nichž jedna posloužila jako varianta referenční a zbylé čtyři byly podrobeny metodám zhušťování postupem THM a TM.

² dle normy EN 789:2004 stanovená pro 4-bodový ohyb

Na deskách byly navrženy zkušební vzorky třech sad, označené římskými číslicemi I, II a III (pro názornější představu je náčrtek vzorků na Obr. 16), v návaznostech na typu kombinace modifikačního postupu. Jednotlivé sady obsahovaly tyto vzorky:

- i) **sada I** – vzorky 50×50 mm v počtu nejméně 6 kusů pro stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti;
- ii) **sada II** – vzorky 50×50 mm v počtu nejméně 8 kusů pro stanovení bobtnání a nasákavosti;
- iii) **sada III** – vzorky 50×230 mm (délka definována jako 20krát tloušťka desky + 50 mm) ve směru podélném i příčném, pro stanovení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti.



Obr. 16: Náčrtek zkušebních vzorků na překližované desce pro stav bez aplikace metod zhušťování

Všechny vzorky byly z překližovaných desek naformátovány až po samotném procesu densifikace. Následně byly vzorky aklimatizovány v klimatizační komoře s prostředím relativní vlhkosti vzduchu $(65 \pm 5) \%$ a teplotou $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ po dobu 2 týdnů.



Obr. 17: Ukázka jednoho vzorku ze sady I o rozměrech 50×50 mm naformátovaných z březových překližovaných densifikovaných desek (A1B1C1, A1B1C2, A2B1C1 a A2B1C2) a referenční desky (R)

Pro budoucí využití densifikovaného deskového materiálu jako adherendu pro vnější vyztužující systém pomocí různých FRP tkanin (CFRP, BFRP) byl v této fázi ověřen vliv modifikace dřeva na hodnoty smáčení lepidla FRP systému. Za tímto účelem byl proveden informativní experiment spočívající v provedení měření hodnot smáčecího úhlu kapky lepidla. Za lepidlo bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo EPOLAM 2017 (poměr 100:30). Stanovení smáčecího úhlu bylo provedeno z profilu kapky lepidla za využití goniometrického okuláru. Odečet úhlu byl prováděn při objemu kapky 5 μ l v době 10 a 60 s od doby nanesení lepidla na povrch překližované desky pomocí mikropipety. Výsledky průměrných hodnot z 10 měření jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5: Výsledné hodnoty smáčecího úhlu epoxidového lepidla

Typ lepidla	Smáčecí úhel			
	REF		A2B1C1	
	10 s	60 s	10 s	60 s
Epalam 2017	25,4	23,1	68,3	65,1

Z výsledků je zřejmé, že termická úprava významně ovlivnila povrchové napětí překližovaných desek a pro další využití takto modifikovaných desek je třeba hledat optimalizaci procesu lepení vnějších FRP tkanin tak, aby bylo dosaženo nejenom řádného procesu smáčení desek, ale i řádného průniku lepidla do vnitřní struktury povrchových dýh.

7.2.3. Použité metody

Na každé sadě zkušebních těles, které byly odebrány dle ČSN EN 326-1:1997, se prováděly zkoušky, jež měly za úkol ověřit míru navržené metody densifikace. Jednalo se o tyto zkoušky: a to i) stanovení objemové hmotnosti a vlhkosti; ii) stanovení poměru objemových hmotností a stlačení; iii) stanovení bobtnání a nasákavosti; iv) stanovení pevnosti v ohybu a stanovení modulu pružnosti.

Stanovení objemové hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena na základě normy ČSN EN 323:1994 na vzorcích rozměru 50×50 mm, které byly ustáleny v klimatizační komoře s prostředím teploty (20±2) °C a relativní vlhkostí vzduchu (65±5) °C. Výsledná hodnota objemové hmotnosti je vyjádřena aritmetickým průměrem hodnot všech zkušebních těles [42].

Stanovení vlhkosti

Dle ČSN EN 322:1994 vychází stanovení vlhkosti zkušebních těles z hmotností ve stavu odběru vzorků a po vysušení v sušárně při teplotě (103±2) °C [43].

Stanovení bobtnání

Ustálené vzorky v prostředí relativní vlhkosti vzduchu (65±5) °C a teploty (20±2) °C jsou dle normy ČSN EN 317:1995 vysušeny do konstantní hmotnosti při teplotě (103±2) °C. Poté jsou umístěny do vodní lázně. Bobtnání vychází ze změny tloušťek vzorku [44].

Stanovení nasákavosti

Pro stanovení nasákavosti je nutné, aby došlo k vážení zkušebních vzorků při stanovování bobtnání. Z těchto hmotností lze stanovit množství absorbované vody.

Stanovení poměru objemových hmotností

Poměr objemových hmotností je parametr, který je stanoven z jednotlivých objemových hmotností vzorků při dosažení konstantní hmotnosti v prostředí relativní vlhkosti vzduchu (65±5) °C a teploty (20±2) °C. Bezrozměrný parametr, udávající nárůst objemové hmotnosti densifikovaných vzorků se získá dle vztahu (4):

$$DR_V = \frac{\rho_{20/65_{dens}}}{\rho_{20/65_{ref}}} \quad (4)$$

kde: $\rho_{20/65_{dens}}$ je objemová hmotnost densifikačních vzorků v prostředí 20/65,

$\rho_{20/65_{ref}}$ je objemová hmotnost referenčních vzorků v prostředí 20/65.

Stanovení poměru stlačení

Poměr stlačení udávající míru deformace buněčné stěny dřevěného prvku, která nastala při působení lisovacího tlaku je stanoven obdobně, jako u stanovení poměru objemových hmotností. Vychází z naměřených tloušťek densifikovaného vzorku a vzorku referenčního v prostředí relativní vlhkosti vzduchu $(65 \pm 5)^\circ\text{C}$ a teploty $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ dle vztahu (5):

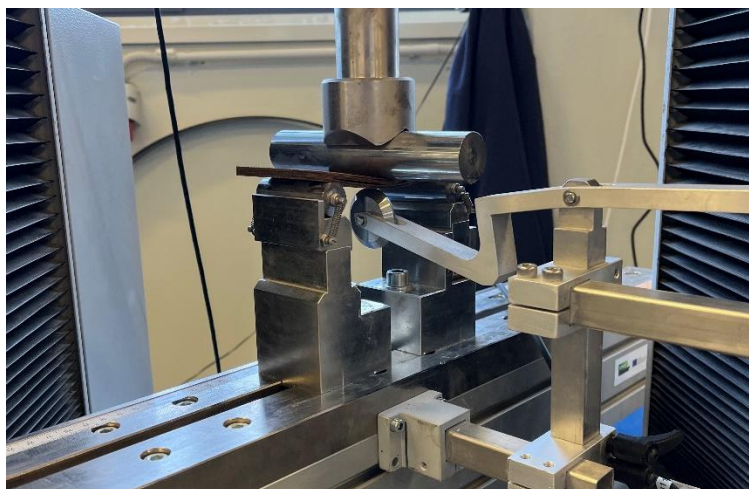
$$CR_V = \frac{t_{20/65_{dens}}}{t_{20/65_{ref}}} \quad (5)$$

kde: $t_{20/65_{dens}}$ je tloušťka densifikačních vzorků v prostředí 20/65,

$t_{20/65_{ref}}$ je tloušťka referenčních vzorků v prostředí 20/65.

Stanovení pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu

Podstata zkoušky pevnosti v ohybu 3-bodovým zatížením spočívá ve stanovení maximální síly, kterou vyvozuje zkušební lis na zkušební těleso. Zkušební tělesa jsou vystavena ohybovému momentu vyvolaného od daného zatížení. Během zkoušky se zaznamenává i příslušný průhyb uprostřed rozpětí vzorku, který slouží k určení modulu pružnosti [45]. Norma ČSN EN 310:1995 stanovuje rozměry zkušebního zařízení. Pro zkoušku bylo využito zkušební zařízení TIRA test 2850 S s rozsahem do 50 kN ve výzkumném pracovišti AdMaS, do kterého byly postupně umísťovány ustálené vzorky označené římskou číslicí III, které byly z referenční i ze zhuštěných desek nařezány ve směru podélném i napříč vláken. Vzorky byly konstantně zatěžovány do stavu porušení se současným záznamem maximální síly pro výpočet pevnosti v ohybu. Během zatěžování docházelo i k odečtu odpovídajícího průhybu sloužícího pro hodnoty modulu pružnosti.



Obr. 18: Zkouška pevnosti v ohybu 3-bodovým zatížením společně s měřením průhybu uprostřed rozpětí vzorku pro stanovení modulu pružnosti v ohybu, zkušební zařízení je lis typu TIRA test 2850 S

8. Výsledky zkoušek a jejich vyhodnocení

8.1. Parametr densifikace

Tloušťka desky byla měřena ve stavu před vložením do lisu a po provedené variantě densifikační úpravy desky, aby bylo možné stanovit kompresní poměr a určit tak míru aplikovaného zhuštění. Vstupní vlhkosti překližovaných březových desek (A1B1C1 a A1B1C2), které se umisťovaly do klimatizační komory na dobu 2 týdnů, měly hodnoty 7,7, resp. 7,8 %. Po této době byla jejich vlhkost znovu naměřena, aby byla zjištěna vstupní vlhkost desek, které se umisťovaly do hydraulického lisu. Stlačení probíhalo při vlhkostech desek 30,8 a 30,3 %.

V Tab. 6 je uveden kompresní poměr pro jednotlivé varianty densifikace. Měření tlouštěk probíhalo na 14 reprezentativních místech, řádně značených, po celém obvodu desky.

Tab. 6: Kompresní poměr jednotlivých variant densifikace

Označení desky	Kompresní poměr CR [%]	Směrodatná odchylka
A1B1C1	43,5	1,2
A1B1C2	34,7	3,1
A2B1C1	21,9	3,8
A2B1C2	24,0	3,5

Největší míra zhuštění proběhla u varianty THM úpravy A1B1C1, jelikož byla průměrná tloušťka desky před densifikací 9,89 mm a po densifikaci se snížila na hodnotu 5,59 mm, což odpovídá kompresnímu poměru 43,5 %. U desek vystavených TM úpravě tvořily rozdíly tlouštěk před a po stlačení hodnot ve výši cca 2 mm, což odpovídá hodnotě kompresního poměru 21,9 resp. 24,0 % pro oba typy stabilizačních úprav.

8.2. Fyzikální vlastnosti densifikované překližované desky

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky měření fyzikálních parametrů: a to i) objemové hmotnosti; ii) vlhkosti; iii) bobtnání a iv) nasákavosti. Tabulky představují průměrné hodnoty těchto parametrů pro jednotlivé metody densifikace. Hodnoty objemové hmotnosti a vlhkosti u referenčních vzorků (REF), TM varianty (A2B1C1, resp. A2B1C2) a THM varianty (A1B1C1) se získaly ze sady 6 vzorků. V případě druhé THM varianty (A1B1C2) byl aritmetický průměr stanoven z 5 vzorků (z technologického hlediska nebylo

možné naformátovat z desky dostatečný počet vzorků). I v případě stanovení bobtnání a nasákavosti bylo vzorků varianty A1B1C2 méně (6 ks) než u variant ostatních (8 ks).

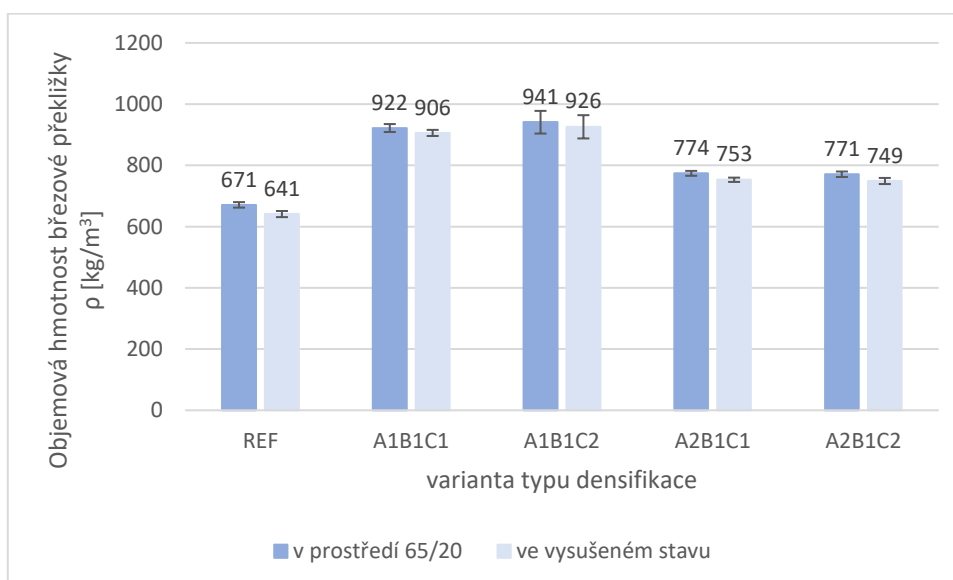
8.2.1. Objemová hmotnost a vlhkost

Výsledné průměrné hodnoty objemové hmotnosti a vlhkosti vzorků všech modifikačních postupů jsou souhrnně uvedeny v následující tabulce Tab. 7. Uvedené průměrné hodnoty objemových hmotností jsou oproti požadavku normy zaokrouhleny na jednotky.

Tab. 7: Průměrné hodnoty objemových hmotností při teplotě vzduchu 20 °C a relativní vlhkosti 65 % a při vysušeném stavu, vlhkosti vzorků při relativní vlhkosti vzduchu 65 % a poměru objemových hmotností

Označení desky	Objemová hmotnost [kg/m ³]				Vlhkost [%]		Poměr objemových hmotností DR _v [-]
	Průměrná hodnota $\rho_{20,65}$	Sm. odchylka	Průměrná hodnota ρ_0	Sm. odchylka	Průměrná hodnota H ₆₅	Sm. odchylka	
REF	678	9	641	10	10,3	0,2	-
A1B1C1	922	13	906	10	5,4	0,2	1,36
A1B1C2	941	37	926	38	5,3	0,2	1,39
A2B1C1	774	8	753	7	6,9	0,2	1,14
A2B1C2	771	9	749	10	7,5	0,3	1,14

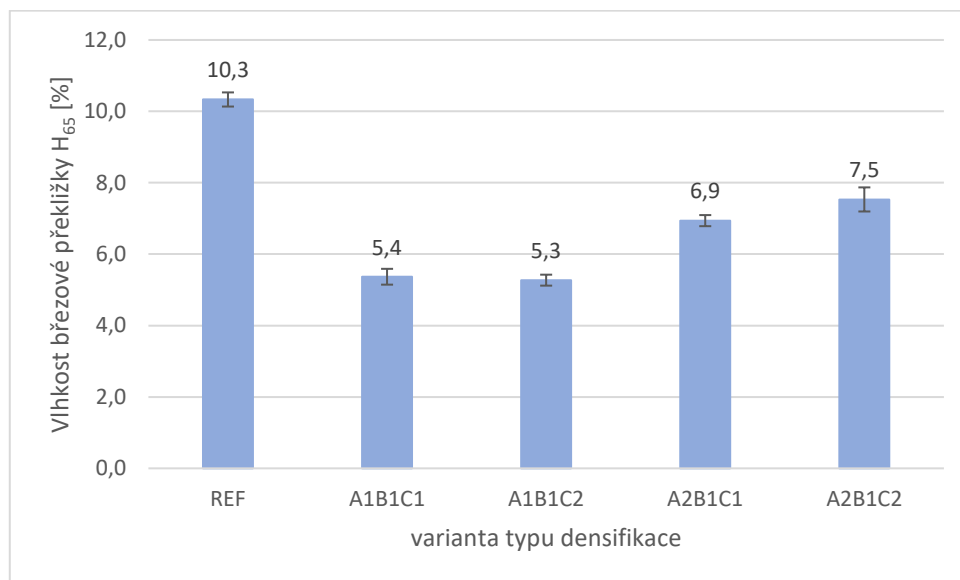
Grafické vyjádření dosažených průměrných hodnot objemových hmotností deskového překližovaného materiálu jsou uvedeny na Obr. 19.



Obr. 19: Grafické znázornění objemových hmotností březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách typu densifikace

Výsledky potvrdily předpokládaný vliv densifikační úpravy na deskovém překližovaném materiálu z březového dřeva. Ve všech variantách došlo k navýšení objemové hmotnosti oproti referenčnímu stavu. Nejvyšší hodnoty vykazuje překližovaná deska upravená metodou THM (A1B1C2), u které došlo k plastifikaci v prostředí relativní vlhkosti vzduchu 90 % a teplotě 30 °C a stabilizaci s následným 16 hodinovým chlazením pod zátěží v hydraulickém lisu. U úpravy THM nárůst tvořil 36 % (A1B1C1) a 39 % (A1B1C2). V případě TM úpravy (A2B1C1, A2B1C2) narostly průměrné hodnoty objemové hmotnosti překližovaných desek o 14 % oproti referenčnímu stavu. U úpravy THM tento nárůst tvořil průměrně 38 %.

Na následujícím grafu jsou znázorněny průměrné hodnoty vlhkostí březových překližovaných desek při expozičním prostředí v klimatizační komoře s relativní vlhkostí vzduchu 65 % a teplotě 20 °C.



Obr. 20: Grafické znázornění vlhkosti březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách typu densifikace

Vlhkost densifikovaných překližovaných desek z březového dřeva poklesla téměř na polovinu u variant THM densifikace (A1B1C1, A1B1C2) oproti referenční hodnotě. Zatímco u TM úpravy došlo k poklesu průměru o 3 % vlhkosti.

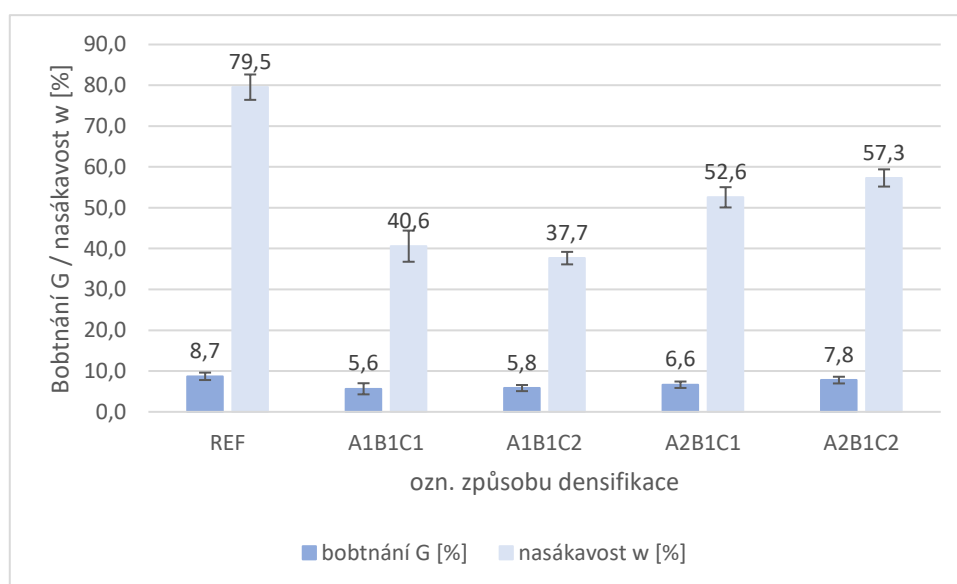
8.2.2. Bobtnání a nasákavost

Výsledky průměrných hodnot bobtnání a nasákavosti po 7 dnech byly získány na vzorcích ze sady II.

Tab. 8: Průměrné hodnoty bobtnání a nasákavosti po 7 dnech a poměru stlačení

Metoda densifikace	Bobtnání [%]		Nasákavost [%]		Poměr stlačení CR _v [-]
	Průměrná hodnota G	Směrodatná odchylka	Průměrná hodnota w	Směrodatná odchylka	
REF	8,7	0,9	79,5	3,1	-
A1B1C1	5,6	1,4	40,6	3,8	0,61
A1B1C2	5,8	0,8	37,7	1,5	0,60
A2B1C1	6,6	0,8	52,6	2,5	0,77
A2B1C2	7,8	0,8	57,3	2,1	0,80

Průměrné hodnoty bobtnání a nasákavosti jsou vzájemně uvedené na následujícím sloupcovém grafu.



Obr. 21: Grafické znázornění bobtnání a nasákavosti březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách typu densifikace

Březové překližky upravené termo-mechanickou úpravou více absorbovaly vodu než desky upravené THM densifikací. Varianta THM je z hlediska působení vodního prostředí odolnější než zbylé varianty, což je patrné i na hodnotách bobtnání. Čtvercové vzorky varianty A1B1C1 a varianty A1B1C2 nabobtnaly nejméně. THM metoda se tedy v tomto experimentu jeví jako nejlepší varianta z hlediska malých rozměrových změn. Tvrzení potvrzuje i fakt, že u těchto vzorků byla výsledná tloušťka desky stlačena až o 40 %.

Předpokládá se, že vlivem teploty (180 °C) dojde k degradaci polysacharidické části, a tudíž i k nižší absorpční schopnosti.

8.3. Fyzikálně-mechanické vlastnosti

Hodnoty průměrných pevností v ohybu a modulů pružnosti jsou odvislé na charakteru densifikovaných desek. Poměr zkoušených vzorků se liší z důvodu výskytu lokální delaminace, jednalo se o vzorky zhuštěných termo-hydro-mechanickou metodou. Hodnoty delaminovaných vzorků byly ze statického souboru vyřazeny, jelikož by docházelo ke zkreslení jednotlivých parametrů. Průměrné hodnoty jsou vždy rozlišeny pro směr podélný a napříč vláken.

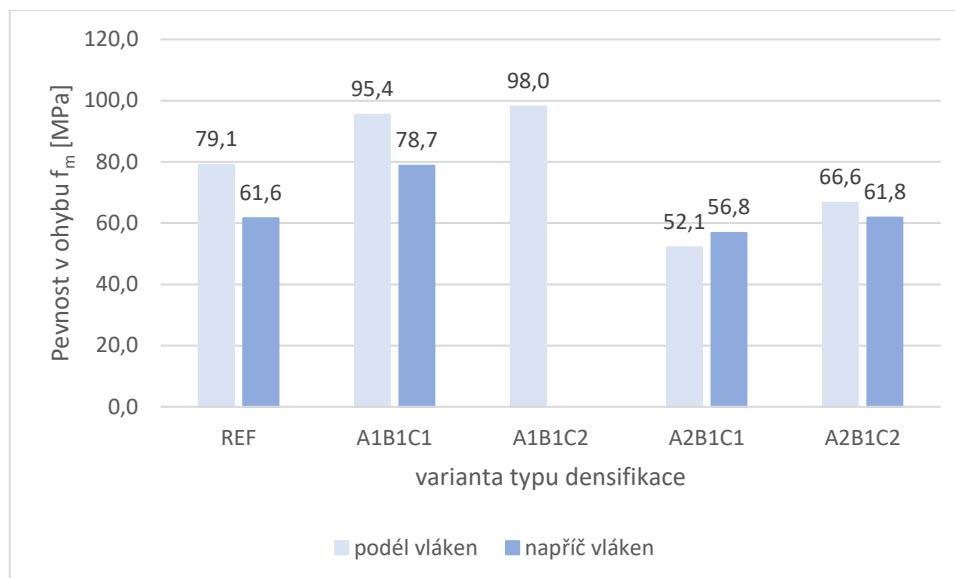
8.3.1. Pevnost v ohybu

V Tab. 8 jsou uváděny průměrné hodnoty pevnosti v ohybu stanovené na vzorcích 3-bodovým ohybem. Rozlišen je vždy směr podélný a napříč vláken. U variant THM desek vykazovaly některé ze vzorků projevy delaminace.

Tab. 9: Průměrné hodnoty pevností v ohybu překližované březové desky při jednotlivých variantách densifikace

Metoda densifikace	Orientace vláken	Pevnost v ohybu [MPa]	
		Průměrná hodnota f_m	Směrodatná odchylka
REF	podél	79,1	5,6
	napříč	61,6	6,7
A1B1C1	podél	95,4	6,1
	napříč	78,7	6,3
A1B1C2	podél	98,0	14,4
	napříč	-	-
A2B1C1	podél	52,1	6,1
	napříč	56,8	7,1
A2B1C2	podél	66,6	4,2
	napříč	61,8	10,6

Vzorky varianty A1B1C2 napříč vláken vykazovaly velké projevy delaminace, a proto z nich nemohla být stanovena reprezentativní průměrná pevnost v ohybu. Pro porovnání všech průměrných hodnot pevností v ohybu, březových překližovaných densifikovaných a referenčních desek, byl stanoven následující sloupcový graf.



Obr. 22: Grafické znázornění pevnosti v ohybu podél a napříč vláken březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách densifikace

Z grafu je patrná závislost objemové hmotnosti na pevnostech densifikovaných březových překližkách variant A1B1C1 a A1B1C2. V těchto případech došlo k nárůstu pevnosti vyvolané zvýšenou objemovou hmotností. Nejmenších pevností dosahovaly vzorky upravené TM variantou (A2B1C1), které byly z desky odebrané ihned po ukončení stlačování v lise (5 hodin). Deska vykazovala projevy delaminace. Referenčních vzorky byly zkoušeny při vlhkosti 7,2 %, v případě THM vzorků při hodnotě vlhkosti 3,3 % a TM vzorků při hodnotě vlhkosti 4,4 %.

Ukázka lokální delaminace, která nastala výhradně u vzorků THM úpravy, je patrná z následujícího obrázku Obr. 23.



Obr. 23: Ukázka delaminace densifikovaného vzorku varianty A1B1C2 pro směr napříč vláken

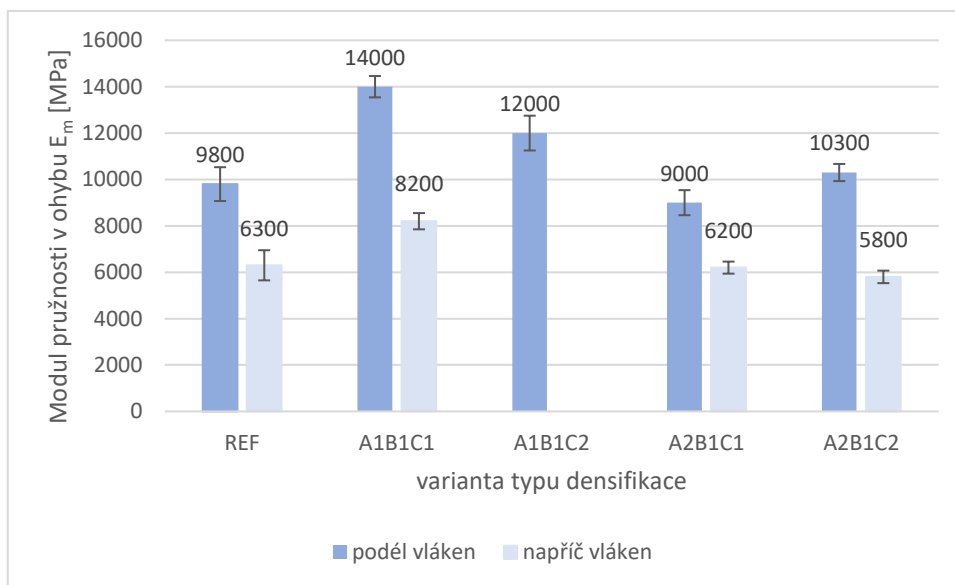
8.3.2. Modul pružnosti v ohybu

Hodnoty průměrného modulu pružnosti stanovovaného současně při pevnosti v ohybu pro jednotlivé varianty densifikovaných překližovaných desek jsou v následující tabulce. Hodnota je zaokrouhlena oproti normě na 2 platné číslice.

Tab. 10: Průměrné hodnoty modulů pružnosti překližované březové desky při jednotlivých variantách densifikace

Metoda densifikace	Orientace vláken	Modul pružnosti [MPa]	
		Průměrná hodnota E_m	Směrodatná odchylka
REF	podél	9800	730
	napříč	6300	650
A1B1C1	podél	14000	460
	napříč	8200	350
A1B1C2	podél	12000	750
	napříč	-	-
A2B1C1	podél	9000	540
	napříč	6200	260
A2B1C2	podél	10300	370
	napříč	5800	270

Grafické vyjádření hodnot modulů pružnosti získaných u jednotlivých variant densifikovaných desek je provedeno v následujícím grafu viz Obr. 24.



Obr. 24: Grafické znázornění modulu pružnosti podél a napříč vláken březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách densifikace

Moduly pružnosti v ohybu vycházely dle očekávání ve směru podél vláken vyšší než ve směru napříč vláken překližované desky. Nejvyšší tuhost měly vzorky zhuštěné variantou THM. Naopak u varianty TM (A2B1C1) hodnota vycházela nižší oproti referenci. Na základě výsledků lze předpokládat, že plastifikací prostředím vlhkosti a teploty (THM) docílíme vyšších hodnot modulu pružnosti než v případě plastifikace termické (TM).

9. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval procesem densifikace překližovaného dřevěného materiálu, což je metoda, při které záměrně zhušťujeme dřevěné materiály za účelem zlepšení jejich výsledných fyzikálních a fyzikálně-mechanických vlastností. V teoretické části jsou nejprve popsány FRP výztužné systémy a jednotlivé typy aplikací na dřevěné konstrukce. Dále je nastíněna samotná problematika densifikace a na ni navazující řešerše výsledků vědeckých studií.

Hlavní cíl bakalářské práce byl splněn realizováním THM a TM densifikace dřevěného materiálu, konkrétně byla zvolena překližovaná březová deska s tloušťkou 9 mm, a vyhodnocením získaných parametrů.

Výsledky prokázaly, že plastifikací překližovaných březových desek po dobu 14 dnů v prostředí 90 % relativní vlhkosti a 30 °C teploty vzduchu (metoda THM) bylo docíleno výraznějšího zhuštění v porovnání s termicko-mechanickou metodou (TM). Tato skutečnost byla potvrzena vyšším nárůstem objemových hmotností překližovaných desek densifikovaných metodou THM. Dílčí varianty THM (A1B1C1, resp. A1B1C2) lišící se mezi sebou typem stabilizace měly nárůst objemové hmotnosti 37 % (A1B1C1), resp. 40 % (A1B1C2) oproti referenčním vzorkům. TM úprava vykazovala nárůst hodnot objemových hmotností výrazně nižší; u vzorků densifikované překližované desky A2B1C1 byl zaznamenán nárůst oproti referenci pouze o 15 %, v případě varianty A2B1C2 pak o 14 %. Provedením densifikace deskových materiálů bylo také dosaženo výrazného poklesu nasákavosti, a to až o 40 % (THM) a o 25 % u TM metody. Při obou metodách začalo docházet k výraznému poklesu bobtnání, a to průměrně o 34 % při aplikaci THM, resp. o 17 % při aplikaci TM densifikace. Z technologického hlediska lze spatřovat negativní vliv vyšší počáteční vlhkosti desek při metodě THM, kdy rychlým vysušením vznikaly v densifikované desce lokální delaminace.

Pevnosti v ohybu podél vláken v případě THM úpravy (A1B1C1) byly zvýšeny o 21 %, v případě směru napříč vláken byly pevnosti zvýšeny o 28 %. I pro variantu densifikované desky stabilizované 16 hodin v lise při zatížení (A1B1C2) byly hodnoty pevnosti v ohybu zvýšeny, a to o 24 %. Výsledky pevností u TM úpravy prokázaly opačný, klesající charakter. Ve směru podél vláken byly pevnosti sníženy v průměru o 25 %, ve směru napříč vláken došlo k poklesu v průměru pouze o 4 %. Termická densifikace teplotou 180 °C bez vlhkostní plastifikace vykazovala negativní vliv na hodnoty modulů pružnosti překližované březové

desky. Naopak nejvyšší hodnoty modulů pružnosti bylo dosaženo u desky A1B1C1 (THM úprava), která byla z lisu odebrána po 5 hodinách stabilizace a vykazala téměř 50% nárůst hodnot oproti referenci. U termicky plastifikované desky teplotou 180 °C (A2B1C1) a která byla stabilizovaná stejným způsobem, byly hodnoty modulu pružnosti sníženy v porovnání s hodnotami referenční desky.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že u termo-hydro-mechanické densifikace překližovaných desek byl jednoznačně potvrzen efekt zlepšení výsledných vlastností dřevěného materiálu.

Seznam použité literatury

- [1] ČUNDERLÍK, Igor. *ŠTRUKTÚRA DREVA*. 2009. Zvolen: Technická univerzita ve Zvolenu, 2009. ISBN 978-80-228-2061-5.
- [2] WIEDENHOEF, Alex C., Roger M. ROWELL, ed. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites: Structure and Function of Wood*. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013. ISBN 978-1-4398-5380-1.
- [3] BODNÁROVÁ, Lenka. *KOMPOZITNÍ MATERIÁLY: MODUL M01, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. Brno: Cerm, 2007.
- [4] JANOUŠEK, Radek. *Možnosti dodatečného zesilování dřevěných prvků*. Brno, 2022. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Jan Vaněrek.
- [5] SCHÖBER, Kay-Uwe, Annette HARTE, Robert KLIGER, Robert JOCKWER, Qingfeng XU a Jian-Fei CHEN. FRP reinforcement of timber structures. *Construction and Building Materials*. 2015, **97**, 106-118. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.020
- [6] RYJÁČEK, P. *Aplikace FRP polymerů pro vybavení železničních mostů*. Praha: Fakulta stavební ČVUT, 2016.
- [7] OKTAEDR - *Seminář FRP výztuže*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. ISBN 978-80-214-4925-1.
- [8] NAMASIVAYAM, A., R. RAJ a H. MOHANDAS. A Feasibility Study on Using Gfrp Composites Bar in Rc Flexural Member. *Innovative Engineering and Physical Sciences*. 2017, **1**(1), 19-24.
- [9] CFRP: CARBON-FIBER-REINFORCED PLASTIC MATERIALS. In: *STAGNOLI THERMOPLASTIC GEARS* [online]. Italy: Stagnoli TG s.r.l., 2018 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.stagnoligears.com/en/motor-gears/production-of-gears-and-components-cfrp/>

- [10] NAYAK, Chittaranjan. Experimental and numerical investigation on compressive and flexural behavior of structural steel tubular beams strengthened with AFRP composites. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*. 2021, **33**(2), 88-94. ISSN 10183639. Dostupné z: doi:10.1016/j.jksues.2020.02.001
- [11] Aramid Fiber. In: *Alibaba* [online]. c1999-2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/Multifunctional-chopped-kevlar-short-fiber-with_60776285503.html
- [12] Aramid Fabrics. In: *IndiaMART* [online]. India, c1996-2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/aramid-fiber-fabric-21447990797.html>
- [13] Basalt Fiber reinforcements unlock longer lifespans, innovative design and efficient repair. In: *MAFIC: BUILDING & CONSTRUCTION INSIGHTS* [online]. 2021 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.mafic.com/building-construction>
- [14] RAFTERY, Gary, Annette HARTE a Peter RODD. Bonding of FRP materials to wood using thin epoxy gluelines. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2009, **29**(5), 580-588. ISSN 01437496. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijadhadh.2009.01.004
- [15] VANĚREK, Jan. *INTERAKCE DŘEVĚNÝCH MATERIÁLŮ S POLYMERNÍMI ADHEZIVY*. Brno, 2015. ISBN 978-80-214-5265-7. ISSN 1213-418X.
- [16] *Uhlíkové lamely: PREFACARB L* [online]. Brno: PREFA KOMPOZITY, 2015 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/wp-content/uploads/2015/09/katalog-letak-prefacarb-cs.pdf>
- [17] VANĚREK, a Petr HRADIL. Evaluation of timber beams reinforced by FRP fabrics. *Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*. 1-7. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/258885254_Evaluation_of_timber_beams_reinforced_by_FRP_fabrics
- [18] ZIGLER, Radek a Marek POKORNÝ. FIRE PROTECTION OF TIMBER STRUCTURES STRENGTHENED WITH FRP MATERIALS. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal*. 2015, **24**(4), 1-8. ISSN 18052576. Dostupné z: doi:10.14311/CEJ.2015.04.0022

- [19] MATOVIČ, Anton. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. První 1993. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-7157-086-9.
- [20] GÁBORÍK, Jozef, Pavol JOŠČÁK, Jozef KULÍK a Tomáš GRZNÁRIK. Properties of compressed laminated beech wood by bending stress. *Forestry and Wood Technology*. Warsaw, 2011, (74), 63-68.
- [21] NEYSES, Benedikt. *Surface Densification of Solid Wood: Paving the Way Towards Industrial Implementation*. Luleå: University of Technology, 2019. ISBN 978-91-7790-436-6. Disertace. University of Technology.
- [22] SADATNEZHAD, Seyed, Abolghasem KHAZAEIAN, Dick SANDBERG a Taghi TABARSA. Continuous Surface Densification of Wood: A New Concept for Large-scale Industrial Processing. *BioResources*. 2017, **12**(2), 3122-3132. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.12.2.3122-3132
- [23] MORSING, Niels a Preben HOFFMEYER. *Densification of Wood: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to grain*. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark, 1998. ISBN 87-7740-294-4. ISSN 1396-2167.
- [24] CABRAL, John, Bidur KAFLE, Mahbube SUBHANI, Johannes REINER a Mahmud ASHRAF. Densification of timber: a review on the process, material properties, and application. *Journal of Wood Science*. 2022, **68**(1), 1-24. ISSN 1435-0211. Dostupné z: doi:10.1186/s10086-022-02028-3
- [25] KUTNAR, Andreja a Milan SERNEK. Densification of wood. *Zbornik Gozdarstva in Lesarstva*. 2007, **82**, 53-62.
- [26] ARRUDA, L a C DEL MENEZZI. Effect of thermomechanical treatment on physical properties of wood veneers. *International Wood Products Journal*. 2013, **4**(4), 217-224. ISSN 2042-6445. Dostupné z: doi:10.1179/2042645312Y.0000000022
- [27] COSTA, Mírian a Cláudio MENEZZI. EFFECT OF THERMO-MECHANICAL TREATMENT ON PROPERTIES OF PARICA PLYWOODS (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke). *Revista Árvore*. 2017, **41**(1), 1-8. ISSN 1806-9088. Dostupné z: doi:10.1590/1806-90882017000100015

- [28] PELIT, Hüseyin, Abdullah SÖNMEZ a Mehmet BUDAKÇI. Effects of Thermomechanical Densification and Heat Treatment on Density and Brinell Hardness of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) and Eastern Beech (*Fagus orientalis* L.). *BioResources*. 2015, **10**(2), 3097-3111. ISSN 1930-2126. Dostupné z: doi:10.15376/biores.10.2.3097-3111
- [29] SKYBA, Oleksandr a Francis SCHWARZE. PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THERMO-HYGRO-MECHANICALLY (THM) – DENSIFIED WOOD. *Wood research*. Switzerland, 2009, **54**(2), 1-18.
- [30] FREITAG, Camille, Frederick KAMKE a Jeffrey MORRELL. Resistance of resin-impregnated VTC processed hybrid-poplar to fungal attack. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2015, **99**, 174-176. ISSN 09648305. Dostupné z: doi:10.1016/j.ibiod.2014.09.013
- [31] KAMKE, Frederick A., ed. Laminated composites from densified wood. In: ŠEMEK, Milan. *Bonding of Modified Wood*. Bled: Národní a univerzitní knihovna Slovinska, 2007, s. 77-85. ISBN 978-961-6144-17-9.
- [32] SALCA, Emilia-Adela, Pavlo BEKHTA a Yaroslav SEBLII. The Effect of Veneer Densification Temperature and Wood Species on the Plywood Properties Made from Alternate Layers of Densified and Non-Densified Veneers. *Forests*. 2020, **11**(6), 1-10. ISSN 1999-4907. Dostupné z: doi:10.3390/f11060700
- [33] BEKHTA, Pavlo, Emilia-Adela SALCA a Aurel LUNGULEASA. Some properties of plywood panels manufactured from combinations of thermally densified and non-densified veneers of different thicknesses in one structure. *Journal of Building Engineering*. 2020, **29**, 1-12. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobbe.2019.101116
- [34] SOZEN, Eser, Nurgul TANKUT a Ali Naci TANKUT. Determination of Shear Strength and Fire Performance of Plywood Supported by Woven E-Glass Fiber. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*. 2016, **2**(3), 4063-4068. ISSN 3159-0040.

- [35] BEKHTA, Pavlo, Peter NIEMZ a Jan SEDLIACIK. Effect of pre-pressing of veneer on the glueability and properties of veneer-based products. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2012, **70**(1-3), 99-106. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-010-0486-y
- [36] BEKHTA, Pavlo, Ján SEDLIAČIK a Dennis JONES. Effect of short-term thermomechanical densification of wood veneers on the properties of birch plywood. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2018, **76**(2), 549-562. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-017-1233-4
- [37] DE MELO, Rafael a Cláudio DEL MENEZZI. Influence of veneer thickness on the properties of LVL from Paricá (*Schizolobium amazonicum*) plantation trees. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2014, **72**(2), 191-198. ISSN 0018-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00107-013-0770-8
- [38] JAKOB, Matthias, Gregor STEMMER, Ivana CZABANY, Ulrich MÜLLER a Wolfgang GINDL-ALTMUTTER. Preparation of High Strength Plywood from Partially Delignified Densified Wood. *Polymers*. 2020, **12**(8), 2-13. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym12081796
- [39] FREY, Marion, Daniel WIDNER, Jana SEGMEHL, Kirstin CASDORFF, Tobias KEPLINGER a Ingo BURGERT. Delignified and Densified Cellulose Bulk Materials with Excellent Tensile Properties for Sustainable Engineering. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2018, **10**(5), 5030-5037. ISSN 1944-8244. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.7b18646
- [40] SONG, Jianwei, Chaoji CHEN, Shuze ZHU et al. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature*. 2018, **554**(7691), 224-228. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/nature25476
- [41] BLOMBERG, Jonas, Bengt PERSSON a Anna BLOMBERG. Effects of semi-isostatic densification of wood on the variation in strength properties with density. *Wood Science and Technology*. 2005, **39**(5), 339-350. ISSN 0043-7719. Dostupné z: doi:10.1007/s00226-005-0290-8
- [42] ČSN EN 323. *Dosky z dreva. Zisťovanie hustoty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.

- [43] ČSN EN 322. *Dosky z dreva. Zisťovanie vlhkosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.
- [44] ČSN EN 317. *Třískové a vláknité desky. Stanovení bobtnání po uložení ve vodě*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1995.
- [45] ČSN EN 310. *Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1995.

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Radiální uspořádání cévic v letokruhu [1]	12
Obr. 2: Elektronový snímek mikroskopické struktury listnatého dřeva [1]	13
Obr. 3: Skleněná vlákna ve formě dlouhého rovingu (nalevo) a tkané textilie (napravo) [8]	17
Obr. 4: Uhlíková CFRP vlákna [9].....	18
Obr. 5: Příklad kevlarového krátkého vlákna (nalevo) a tkaniny z aramidových vláken (napravo) [11] [12]	19
Obr. 6: Ukázka tyčí na bázi čedičových vláken (BFRP) [13]	19
Obr. 7: Teplota skelného přechodu (T_G) tří základních složek dřeva jako funkce obsahu vlhkosti [21] [24].....	23
Obr. 8: Znázornění zpětného odpružení (spring-back) a zotavení (set-recovery) v řezu dřevěné buňky, žlutá barva značí neplastifikované dřevo, červená naopak dřevo plastifikované, šipkami je znázorněno působení zatížení [21]	25
Obr. 9: Patentové zařízení pro kontinuální zhušťování metodou VTC (1 - oblast zahřívání a kondicionování, 2 - zóna měknutí dřeva rychlou dekompresí par, 3 - oblast komprese, 4 - oblast žihání pro podporu tepelné degradace a relaxace, 5 - zóna chlazení) [24]	27
Obr. 10: Intervalový graf pevnosti v ohybu pro překližky z břízy a olše černé [32]	30
Obr. 11: Intervalový graf pevnosti ve smyku pro překližky z břízy a olše černé [32].....	30
Obr. 12: Vztah mezi pevností v ohybu (MOR) a tloušťkou překližkových panelů [33]....	32
Obr. 13: Zlomeniny vzorků překližky při zkoušce pevnosti v ohybu [33]	32
Obr. 14: Snímky z elektronového mikroskopu zobrazující zhroucení raného dřeva neošetřených referenčních vzorků (Ref), zhuštěných po napuštění vodou (H_2O), zhuštěných po alkalické delignifikaci (AL) a zhuštěných po organosolvové delignifikaci (OS) [38]...	34
Obr. 15: Ukázka způsobu stlačení: vlevo systém nerezové síto a březová překližka, vpravo je zachycen proces stlačení s pohledem mezi topné desky lisu.....	39
Obr. 16: Návrh zkušebních vzorků na překližované desce pro stav bez aplikace metod zhušťování	41

Obr. 17: Ukázka jednoho vzorku ze sady I o rozměrech 50×50 mm naformátovaných z březových překližovaných densifikovaných desek (A1B1C1, A1B1C2, A2B1C1 a A2B1C2) a referenční desky (R)	42
Obr. 18: Zkouška pevnosti v ohybu 3-bodovým zatížením společně s měřením průhybu uprostřed rozpětí vzorku pro stanovení modulu pružnosti v ohybu, zkušební zařízení je lis typu TIRA test 2850 S	44
Obr. 19: Grafické znázornění objemových hmotností březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách typu densifikace	46
Obr. 20: Grafické znázornění vlhkosti březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách typu densifikace	47
Obr. 21: Grafické znázornění bobtnání a nasákavosti březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách typu densifikace	48
Obr. 22: Grafické znázornění pevnosti v ohybu podél a napříč vláken březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách densifikace.....	50
Obr. 23: Ukázka delaminace densifikovaného vzorku varianty A1B1C2 pro směr napříč vláken	50
Obr. 24: Grafické znázornění modulu pružnosti podél a napříč vláken březových překližovaných desek v závislosti na jednotlivých variantách densifikace.....	51

Seznam použitých tabulek

Tab. 1: Vlastnosti nejčastěji používaných matric v systému FRP [3] [4]	15
Tab. 2: Kombinace dílčích kroků procesu densifikace deskového materiálu	38
Tab. 3: Technické parametry hydraulického lisu HL 400	38
Tab. 4: Vlastnosti březové překližky udávané výrobcem.....	40
Tab. 5: Výsledné hodnoty smáčecího úhlu epoxidového lepidla	42
Tab. 6: Kompresní poměr jednotlivých variant densifikace.....	45
Tab. 7: Průměrné hodnoty objemových hmotností při teplotě vzduchu 20 °C a relativní vlhkosti 65 % a při vysušeném stavu, vlhkosti vzorků při relativní vlhkosti vzduchu 65 % a poměru objemových hmotností	46
Tab. 8: Průměrné hodnoty bobtnání a nasákavosti po 7 dnech a poměru stlačení	48
Tab. 9: Průměrné hodnoty pevností v ohybu překližované březové desky při jednotlivých variantách densifikace	49
Tab. 10: Průměrné hodnoty modulů pružnosti překližované březové desky při jednotlivých variantách densifikace	51