

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra základního zpracování dřeva a biomateriálů



Česká zemědělská univerzita v Praze
**Fakulta lesnická
a dřevařská**

**Vliv umělého stárnutí dřevoplastových kompozitních materiálů (WPC)
s přídatkem částic ze stonků řepky ozimé na jejich mechanické
vlastnosti**

Diplomová práce

Autor: Bc. Barbora Belková

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, Ph.D.

Konzultant: Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Barbora Belková

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv umělého stárnutí dřevoplastových kompozitních materiálů (WPC) s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé na jejich mechanické vlastnosti

Název anglicky

An affect of artificial wethering of wood-plastic composite (WPC) filled by particles from rapeseed stems on his mechanical properties

Cílem práce je stanovení vlivu umělého stárnutí dřevoplastových kompozitních materiálů s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé na mechanické vlastnosti těchto materiálů

Metodika

1. Vypracování literární rešerše na základě studia odborné literatury věnující se problematice výroby WPC z alternativních surovin a jejich vlastnostem, jako i změně těchto vlastností ve vztahu k umělému stárnutí.
2. Příprava a zajištění vzorků z různých typů WPC pro experimentální měření.
3. Experimentální měření mechanických vlastnosti dřevoplastových kompozitních materiálů před a po umělém stárnutí.
4. Vyhodnocení zjištěných výsledků pomocí statistických metod.

Doporučený rozsah práce

60-80 stran

Klíčová slova

dřevoplast, řepka ozimá, WPC, umělé stárnutí, kompozitní materiál

Doporučené zdroje informací

- FABIYI, J. S. Chemistry of Wood Plastic Composite Weathering. PhD. Thesis, University of Idaho, 2007, 418 s.
- GAJDAČOVÁ, P., HÝSEK, Š., JARSKÝ V. Utilisation of winter rapeseed in wood-based materials as a solution of wood shortage and forest protection. *BioResources* 13(2), 2018, s. 2546-2561.
- HUANG, L., XIA, P., LIU, Y., FU, Y., JIANG, Y., LIU, S., WANG, X. Production of biodegradable board using rape straw and analysis of mechanical properties. *BioResources* 11(1), 2016, s. 772-785
- KIM, K. K., PAL, K. Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites. Springer Science & Business Media, 2010, 176 s. ISBN: 978-3-642-14876-7
- KLYOSOV, A. A. Handbook of Wood-Plastic Composites. John Wiley & Sons, 2007, 728 s. ISBN: 978-0-470-14891-4
- NISKA, K. O., SAIN, M. Wood-Polymer Composites. Woodhead Publishing Ltd, 2008, 384 s. ISBN: 978-1-84569-272-8
- PANDA, H. Handbook on Coal, Coke, Cotton, Lignin, Hemicellulose, Wood, Wood-Polymer Composites, Lignocellulosic-Plastic Composites from Recycled Materials, Wood Fiber, Rosin and Rosin Derivatives. Niir Project Consultancy Services, 2018, 512 s. ISBN: 978-93-81039-86-1
- ROWELL, R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 2. vydání, CRC Press, 2012, 703 s. ISBN: 978-1-43985-380-1
-

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 11. 04. 2019

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv umělého stárnutí dřevoplastových kompozitních materiálů (WPC) s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé na jejich mechanické vlastnosti“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, Ph.D. a použila jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze dne

.....

Bc.Barbora Belková

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala všem, kteří mi poskytli pomoc, radu a podporu při psaní diplomové práce. V první řadě děkuji Ing. Miroslavu Gašparíkovi, Ph.D. za jeho trpělivost, cenné připomínky a odborné vedení práce. Také bych ráda poděkovala konzultantovi Ing. et Ing. Štěpánovi Hýskovi, Ph.D. za odbornou pomoc, trpělivost a odborné vedení experimentálního měření. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat doc. Ing. Milanu Gaffovi, Ph.D. za pomoc při statistickém zpracování výsledků.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývala otázkou kompozitních materiálů konkrétně, dřevo-plastovými kompozity označovanými názvem Wood-Plastic Composite, zkratkou WPC, někdy nazývané jako „dřevoplast“. WPC materiál se skládal z plniva, kde byla využita řepka ozimá, dub a teak. Další složkou je polymer v podobě polyetylenu, dále byly přidány aditiva.

Práce se rozděluje do dvou velkých skupin, řešerše dané problematiky a následuje výzkum, zde je popsána zkouška na vybrané druhy materiálů a umělé stárnutí materiálu. Na pěti variantách WPC byly zkoumané charakteristické ohybové vlastnosti po umělém stárnutí daného materiálu. Na všech variantách byla provedená stejná zkouška v podobě tříbodového statického ohybu před a po umělém stárnutí a výsledky poté porovnány. Cílem výzkumu bylo ověřit ohybovou charakteristiku alternativy plniva v podobě řepky ozimé, která je vyhovující.

Klíčová slova: dřevoplast, řepka ozimá, WPC, umělé stárnutí, kompozitní materiál

Abstract

The thesis is focus on issue of composite materials specifically, wood-plastic composites, known as WPC, sometimes referred as "wood-plastic". WPC material consisted of a filler where, were used rapeseed, oak and teak. Another component is polyethylene which has been used as polymer, and additives have been used as well.

The work is divided into two large groups, research of the issue followed by research, in this group is a test on selected types of materials and an artificial aging of material. The five WPC variants were examined by characteristic bending properties after artificial aging of the material. All variants were subjected to the same three-point static bending test before and after artificial aging, and the results were then compared.

Keywords: wood-pastic, rapeseed, WPC, artificial aging, composite material

OBSAH

1. Úvod.....	13
2. Cíle práce	14
3. Materiály na bázi dřeva.....	15
3.1. Kompozitní materiál WPC	16
3.1.1. Složení WPC.....	17
3.1.1.1. Dřevní hmota	18
3.1.1.1.1. Dřevní vlákna	20
3.1.1.1.2. Dřevní moučka	21
3.1.1.2. Alternativní materiály	21
3.1.1.2.1. Rýžové slupky	21
3.1.1.2.2. Přírodní vlákna	22
3.1.1.2.3. Řepka ozimá.....	23
3.1.1.3. Polymer	23
3.1.1.3.1. Polyvinylchlorid.....	24
3.1.1.3.2. Polyetylén.....	24
3.1.1.3.3. Polypropylen	25
3.1.1.4. Aditiva.....	25
3.1.2. Výroba WPC.....	27
3.1.3. Vlastnosti materiálu	30
3.1.3.1. Fyzikální vlastnosti	30
3.1.3.2. Mechanické vlastnosti.....	30
3.1.3.3. Fyzikální a mechanické vlastnosti WPC.....	32
3.1.4. Využití WPC.....	36
4. Metodika	38
4.1. Vstupní materiál	38
4.2. Experimentální část	40
4.3. Umělé strárnutí WPC materiálu	40
4.4. Ohybové charakteristiky WPC	43
5. Výsledky ohybové charakteristiky a diskuse.....	44
5.1. Modul pružnosti.....	45
5.2. Mez úměrnosti	48
5.3. Minimální poloměr ohybu	50

5.4. Koeficient ohýbatelnosti.....	55
6. Závěr.....	62
Seznam použité literatury a internetových zdrojů	63

Seznam tabulek

Tab. 1 Mechanické vlastnosti smrkového dřeva o vlhkosti 12% (Wolcott a kol 2004)

Tab. 2 Materiálové složení používaného WPC materiálu

Tab. 3 Podílové složení plastu a aditiv používaného WPC materiálu

Tab. 4 Rozdělení WPC materiálu z hlediska použití barviva a povrchové úpravy

Tab. 5 Modul pružnosti před umělým stárnutím

Tab. 6 Modul pružnosti po umělém stárnutí

Tab. 7 Průměrné hodnoty modulu pružnosti

Tab. 8 Mez úměrnosti před umělým stárnutím

Tab. 9 Mez úměrnosti po umělém stárnutí

Tab. 10 Průměrné hodnoty mez úměrnosti

Tab. 11 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ před umělým stárnutím

Tab. 12 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ po umělém stárnutí

Tab. 13 Průměrné hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min B}$

Tab. 14 Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ před umělým stárnutím

Tab. 15 Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ po umělém stárnutí

Tab. 16 Průměrné hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min C}$

Tab. 17 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} před umělým stárnutím

Tab. 18 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} po umělém stárnutí

Tab. 19 Průměrné hodnoty koeficientu ohýbatelnosti k_{ohB}

Tab. 20 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} před umělým stárnutím

Tab. 21 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} po umělém stárnutí

Tab. 22 Průměrné hodnoty koeficientu ohýbatelnosti k_{ohC}

Seznam obrázků

- Obr. 1 Materiály na bázi dřeva (Böhm a kol. 2012)
- Obr. 2 WPC materiál – barevné variace (Wpc-Poolterrasse 2019)
- Obr. 3 Obsah hlavních složek dřevoplastu (Autor)
- Obr. 4 Schéma kmene stromu (Nováček 2019)
- Obr. 5 Základní řezy kmenem – Makroskopická struktura (Bředcová 2019)
- Obr. 6 Mikroskopická stavba dřeva (Novotná 2019)
- Obr. 7 Formy dřevních částic (WoodflourMill 2019)
- Obr. 8 Rýžové slupky (Depositphotos 2019)
- Obr. 9 Vlákna z konopí (Ekostavivo 2019)
- Obr. 10 Schéma postupu výroby WPC materiálu (Autor)
- Obr. 11 Granulát WPC materiálu (Flour Wood 2019)
- Obr. 12 Rozdělení typů extrudéru (Bláha 2016)
- Obr. 13 Schéma rozdělení mechanických charakteristik (Publi 2019)
- Obr. 14 Pracovní diagram (Zlomková 2019)
- Obr. 15 Vliv obsahu dřevěných pilin na pevnost v tahu a nárazu (Sombatsompop a kol. 2003)
- Obr. 16 Vliv obsahu dřevěných pilin na pevnost v tahu a nárazu (Sombatsompop a kol. 2003)
- Obr. 17 Vliv obsahu dřevěných pilin u modulu ohybu a pružnosti (Sombatsompop a kol. 2003)
- Obr. 18 Mechanické vlastnosti WPC materiál v závislosti deformace na napětí (Niska a Sain 2008)
- Obr. 19 Plot z materiálu WPC (Magoya 2019)
- Obr. 20 Terasa u bazénu z materiálu WPC (Flour Wood 2019, Art bazény 2019)
- Obr. 21 Varianty používaného WPC materiálu (Autor)
- Obr. 22 Mrazací box Liebherr LGT 3725 (Autor)
- Obr. 23 Uložení vzorku do mrazícího boxu (Autor)
- Obr. 24 Sušící horkovzdušná komora Memmert (Autor)
- Obr. 25 Rozložení vzorků v horkovzdušné sušárně (Autor)
- Obr. 26 Schéma třibodového statického ohybu (Zlomková 2019)
- Obr. 27 Pracovní diagram WPC materiálu (Zlomková 2019)
- Obr. 28 Trhací stroj Tira s třibodovým ohybem WPC – dub 3 (Autor)

Seznam grafů

Graf 1 Modul pružnosti před umělým stárnutím

Graf 2 Modul pružnosti po umělém stárnutí

Graf 3 Mez úměrnosti před umělým stárnutím

Graf 4 Mez úměrnosti po umělém stárnutí

Graf 5 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ před umělým stárnutím

Graf 6 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ po umělém stárnutí

Graf 7 Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ před umělým stárnutím

Graf 8 Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ po umělém stárnutí

Graf 9 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} před umělým stárnutím

Graf 10 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} po umělém stárnutí

Graf 11 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} před umělým stárnutím

Graf 12 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} po umělém stárnutí

Seznam použitých zkratek a symbolů

WPC	Dřevoplastový kompozit - Wood-Plastic Composite
OSB	Deska z orientovaných pochých třísek
MDF	Vláknitá deska se střední hustotou
P	Příčný (transversální) řez kmene
R	Radiální (středový, podélný) řez kmene
T	Tangenciální (tečnový) řez kmene
PVC	Polyvinylchlorid
PE	Polyetylén
PP	Polypropylen
PS	Polystyrén
LDPE	Nízko-hustotní polyetylén
HDPE	Vysoko-hustotní polyetylén
ABS	Kopolymer akrylonitril-butadien-styren
ANOVA	Analýza rozptylu - Analysis of variance
P	Hladina významnost

1. Úvod

V současné době se velmi řeší otázka plastů a jejich využití neustále narůstá. Celosvětová spotřeba plastu činí 300 milionů tun za rok v porovnání s rokem 1950, kdy se vyrobilo a spotřebovalo 1,5 milionu tun plastů. Za necelých šedesát let se spotřeba plastu ročně navýšila o 298,5 milionů tun (Jež 2018). Z celkového množství se spotřebovalo 20 % plastů ve stavebnictví. Dnešní společnost nechce být lhostejná k přírodě a životnímu prostředí, a tak klade velké nároky na vlastnosti využitých plastů, aby byly ekologické a zdravotně nezávadné. WPC materiál tyto požadavky splňuje, především díky přírodnímu plnivu.

Dřevo je přírodně obnovitelná surovina, která je zcela recyklovatelná. Mezi kladné vlastnosti dřeva patří příjemná vůně a textura, naopak k nežádoucím účinkům patří anizotropie, hydroskopicita, velké množství vad, rozměrová nestálost, praskání, šednutí a další. Jelikož byla snaha o eliminaci negativních vlastností dřeva, vznikly WPC materiály, které zachovávají vzhled dřeva, ale mají lepší tvarovou stálost a mechanické vlastnosti ve srovnání se dřevem. WPC materiál najde velké uplatnění, jak v interiéru v podobě nábytku, tak především v exteriéru, kde lépe, než dřevo odolává povětrnostním podmínkám, nalezne uplatnění například ve výrobě plotových dílů, vnějších fasád, teras, podlahách či venkovního nábytku.

Diplomová práce se zabývá výzkumem ohybové charakteristiky u vybraných variant WPC materiálu, které projdou procesem umělého stárnutí. V práci bylo využito pět variant, které dodala firma Plastic Two, a. s., kde dřevní plnivo bylo z dubu a teaku a alternativní plnivo tvořily stonky z řepky ozimé. Výsledky ohybové charakteristiky před a po umělém stárnutí byly porovnány a statisticky zpracovány.

2. Cíle práce

Cílem práce je stanovení vlivu umělého stárnutí dřevoplastových kompozitních materiálů s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé na mechanické vlastnosti těchto materiálů:

1. Vypracování literární rešerše na základě studia odborné literatury věnující se problematice výroby WPC z alternativních surovin a jejich vlastnostem, jako i změně těchto vlastností ve vztahu k umělému stárnutí.
2. Příprava a zajištění vzorků z různých typů WPC pro experimentální měření.
3. Experimentální měření mechanických vlastností dřevoplastových kompozitních materiálů před a po umělém stárnutí.
4. Vyhodnocení zjištěných výsledků pomocí statistických metod.

3. Materiály na bázi dřeva

Materiály na bázi dřeva se vytvořili, především proto, aby se částečně odstranili nedostatky rostlinného dřeva, jako je například pohlcování vlhkosti, anizotropie, nehomogenita. S odstraněním nehomogenity přírodního dřeva se rozšířila různorodost jednotlivého konstrukčního řešení. Anizotropii kompozitních materiálů se daří regulovat pomocí orientace a velikosti dřevních částic. Také větší spotřeba dřeva ve stavebnictví byla velkým podmětem k vývoji nových kompozitních velkoplošných materiálů s dobrými mechanickými i fyzikálními vlastnostmi. Díky snaze vyvinout materiály, které využívají kladné dřevní vlastnosti jako jsou dobré izolační vlastnosti, snadná výroba, dobrá opracovatelnost s nízkou energetickou náročností při výrobě, nám vznikly materiály vyobrazené na Obr. 1. Další výhodou těchto materiálů je možnost efektivnějšího využívání přírodního dřeva, tedy materiály jsou vyráběné především ze sortimentů nízké kvality a rychle rostoucích druhů dřevin. Ve srovnání s ostatními materiály mají menší zatížení na životní prostředí z důvodu minimální spotřeby chemických látek, které jsou ve výsledném výrobku zahrnuté. Velká výhoda je také větší odolnost materiálu vůči biotickým činitelům a také větší odolnosti proti ohni po přidání chemických přípravků a retardérů hoření (Böhm a kol. 2012).



Obr. 1 Materiály na bázi dřeva (Böhm a kol. 2012)

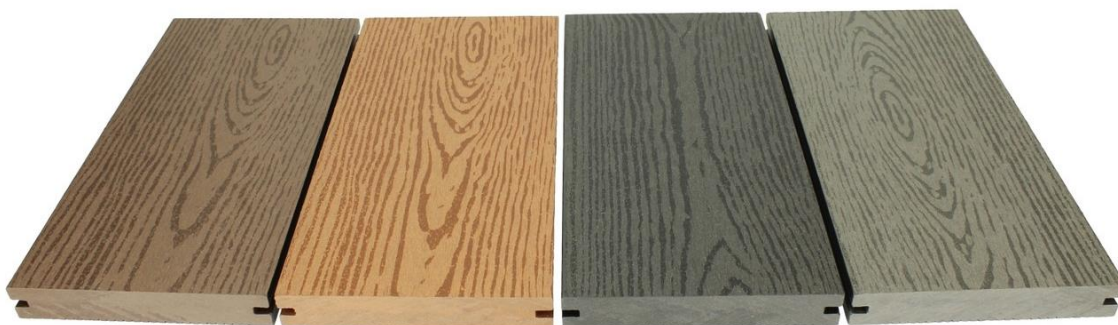
(Zleva: spárovka, překližka, deska z orientovaných pochých třísek – OSB, dřevostřísková deska, izolační měkká vláknitá deska, vláknitá deska se střední hustotou – MDF, dřevo-plastová deska – WPC, sendvičový panel)

3.1. Kompozitní materiál WPC

Kompozitní materiály označované zkratkou WPC z anglických slov Wood-Plastic Composite, v překladu označované jako dřevo-plastové kompozity, někdy nazývané jako „dřevo-plasty“. Jsou termoplasticky zpracované heterogenní materiály, spojením jednotlivých umělých hmot a vyráběny moderními technologiemi, které za pomoci stlačení nebo lisování vytvoří specifikovaný tvar výrobků (Niska a Sain 2008).

Spojením dřevního plniva a plastového polymeru vytvoří WPC materiál mechanickou a chemicky odolnou směs s nízkou absorpcí vody, odolnou proti plísním a dřevokazným houbám (WPC Terasy 2019). Materiál má i dobrou rozměrovou stálost a odolnost proti zvýšené vlhkosti, a to i při dlouhodobém ponoření materiálu do vody. Vstřebání vody zpravidla nepřesáhne 20 – 30%. Další výhodou dřevo-plastového materiálu je odolnost proti atmosférické korozi. Porovnání dřeviny a WPC materiálu při stejném účelu použití mají WPC materiály celkově vyšší barevnou stálost a celkovou odolnost. Nepřehlédnutelnou nevýhodou je ale vysoká hustota, která bývá kompenzována vylehčováním dřevo-plastových profilů. V současnosti vyráběné dřevo-plastové materiály mají při nízkých teplotách větší pevnost než při běžných teplotách. (Böhm a kol. 2012).

WPC se v posledních dvaceti letech stal nejmodernějším komerčním produktem s rostoucím potenciálem v tržní ekonomice v oblasti nábytku a stavebnictví. Dřevoplast má historii v Evropě, ale až roku 1990 byla hlavní komercializace tohoto materiálu (Kříž 1960, Niska a Stain 2008). Trend tohoto materiálu přišel ze Spojených Států Amerických firmou Standex. Materiál měl za cíl zachovat estetické vlastnosti přírodního dřeva viz Obr. 2 a zároveň vyrovnat nedostatky rostlého dřeva, jako náchylnost ke změnám způsobenými atmosférickými vlivy nebo změnám barvy (Niska a Sain 2008).

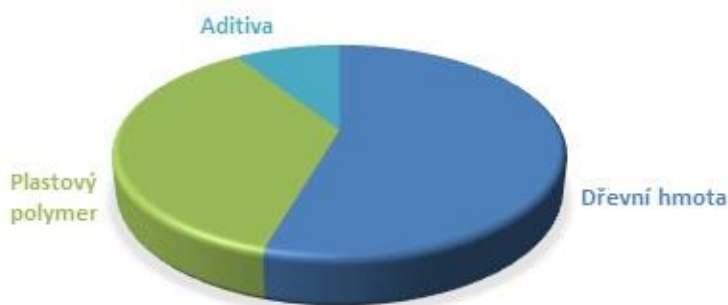


Obr. 2 WPC materiál – barevné variace (Wpc-Poolterrasse 2019)

3.1.1. Složení WPC

WPC materiály jsou složené ze dvou a více složek, odlišného původu, strukturou chemického složení a mechanickými i fyzikálními vlastnosti. Jedná se o materiály na bázi dřeva, tedy dřevní složka (plnivo) a plastového polymeru, nazývané také jako polymerní matrice (pojivo). Při zahřátí polymerní matrice lehce tečou, umožňují vysokou flexibilitu zpracování v kombinaci se dřevem. Polymery se také více smršťují a bobtnají s vyšší teplotou a velká výhoda je, že absorbují jen malé procento vlhkosti, pokud je kompozitní materiál dobře navržený. Samotné dřevo obsahuje polymery (celulóza, hemicelulóza, lignin). Dřevo je používáno jako plnivo z důvodu odlišných vlastnostech od syntetických polymerů, zejména z důvodu levnější ceny a pevnějších a tužších vlastnostech, a proto se používá jako plnivo (výztuž) daného materiálu (Niska a Sain 2008, Osswald a Menges 2012, Lange 2013).

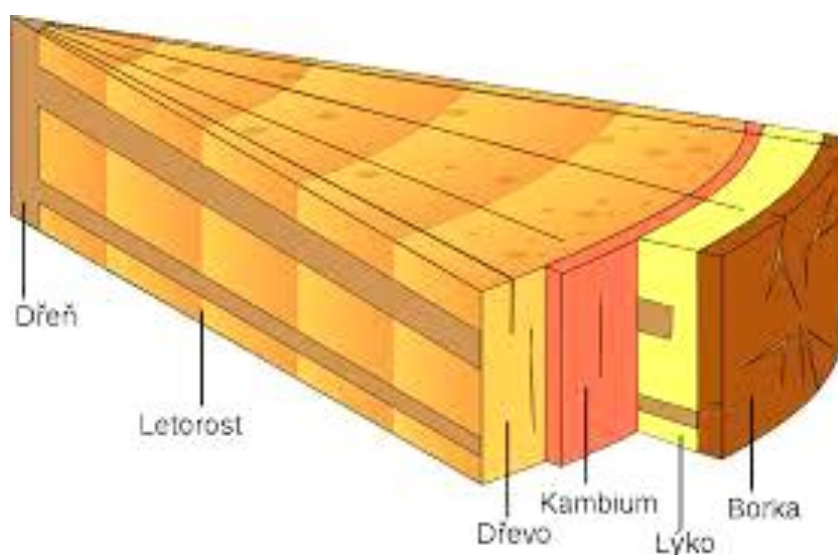
Velice záleží na kvalitě a poměru jednotlivých složek, které ovlivňují vlastnosti i vzhled výsledného materiálu, toto považujeme za velkou výhodu WPC materiálu. Složení jednotlivých prvků se pohybuje v rozmezí 50 – 70% dřevitého substrátu a 30 - 50 % plastového polymeru a aditiva 0,1 – 10% hmotnosti směsi. Na schématu je vyobrazené zastoupení jednotlivých podílů složek ve výsledném dřevo-plastovém produktu viz Obr. 3. Zjednodušený vysvětlením jde o plast naplněný celulóзовými vlákny. Ovšem výsledný poměr dřevní složky a plastového polymeru je rozdílný podle použité výrobní technologie či výrobce. Optimální poměr složek bývá popisován 60 % dřevní složky a 40 % polymeru. Při větším poměru dřevního substrátu platí, že materiál je méně odolný vůči vnějším vlivům a vlastnosti se více blíží přírodnímu dřevu, naopak když je přidána více polymerové složka, povrch materiálu je na dotek syntetický a více odolný (Niska a Sain 2008, Böhm a kol. 2012, Lange 2013).



Obr. 3 Obsah hlavních složek dřevoplastu (Autor)

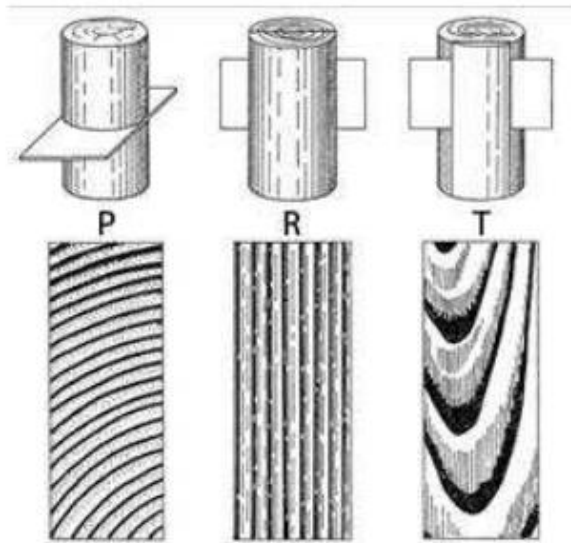
3.1.1.1. Dřevní hmota

Důležitou složkou WPC výrobků je dřevo (dřevní hmota). Dřevo je přírodní materiál organického původu, který patří do obnovitelných zdrojů. Složeno z kulatých, podlouhlých nebo obdélníkových buněk, délka těchto buněk je výrazně větší než jejich šířka. Délka buněk je pak rovnoběžná s délkou stromu. Za pomoci mizového pletiva, vrstviček živých buněk (kambium) vzniká dřevo. Dřevo se nachází mezi dřením a kambiem viz. Obr. 4. Za jedno vegetační období narůstáním dřevní hmoty vznikne letokruh, který má dvojí zbarvení. Na jaře dřevní hmota má světlejší zbarvení a vzniká část letokruhu nazývaná jako jarní dřevo. V létě vzniká vnější část letokruhu, která je tvrdší a má tmavší zbarvení, nazývaná jako letní dřevo. Jarní dřevo má funkci převážně k vedení vody oproti letnímu dřevu, které má funkci mechanickou (Fíček 2019).



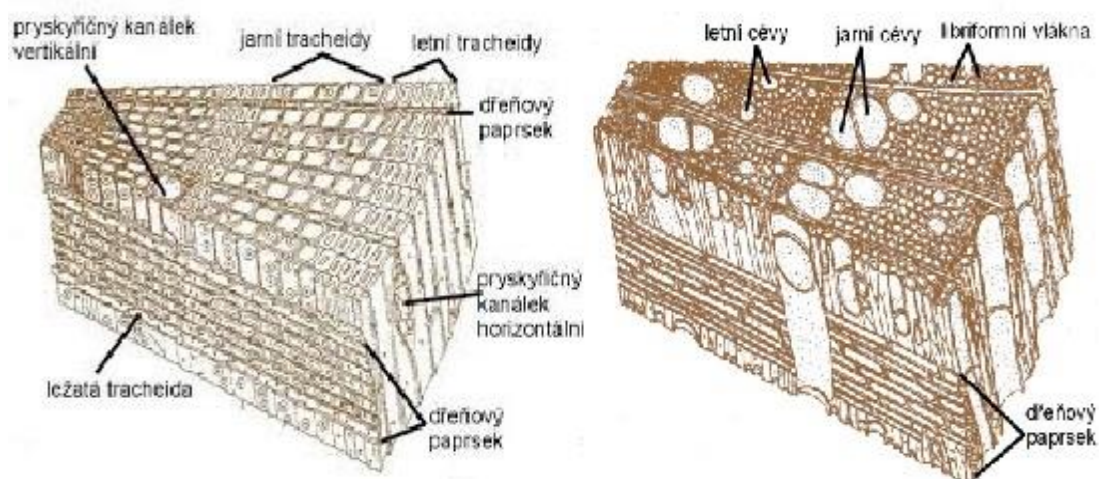
Obr. 4 Schéma kmeně stromu (Nováček 2019)

Z makroskopická struktura je rozeznatelná pouhým okem na rozdíl od mikroskopické struktury dřeva. Pro určení jednotlivých druhů dřev, rozeznáváme tři základní řezy kmenem Obr. 5 příčný (transversální) označovaný jako P, radiální (středový, podélný) označovaný zkratkou R a tangenciální (tečnový) označovaný zkratkou T.



Obr. 5 Základní řezy kmenem – Makroskopická struktura (Bředcová 2019)
(Zleva: Příčný, radiální, tangenciální)

Na mikroskopické úrovni (Obr. 6) lze odlišovat podle složitosti struktury jehličnaté dřevo tvořeno jednodušší strukturou, která má dva základní anatomické elementy – tracheidy a parenchymatické buňky. U listnatého dřeva, kde se nachází složitější struktura, má specializované anatomické elementy – cévy, tracheidy, libriformní vlákna, parenchymatické buňky atd (Vlačková 2019).



Obr. 6 Mikroskopická stavba dřeva (Novotná 2019)
(Zleva: Jehličnaté dřevo, Listnaté dřevo)

Chemické složení dřeva se skládá z přírodních polymerů celulózy, hemicelulózy a ligninu, které spořádávají strukturu buněčné stěny a mezibuněčnou hmotu. V dřevním komplexu mají zastoupení 90–98 %. Doprovodné (akcesorické) složky dřeva mají zastoupení zbývajících 3–10 % a jsou ze dřeva extrahovatelné, rozpustné v rozpouštědlech. Všechny složky zastoupené v dřevní hmotě mají charakteristické vlastnosti, které významně ovlivňují vlastnosti dřeva. Celulóza je základní stavební jednotka buněčné stěny, tvořící konturu zdřevnatělé buněčné stěny zastoupená podle druhu dřeviny u jehličnatých dřevin se pohybuje v rozmezí 48–56 %, u listnatých dřevin je rozmezí 45–48 % z celkové hmotnosti dřeva. Polysacharidickou část nám tvoří i hemicelulóza, která má vyšší zastoupení u listnatých dřevin, v průměru se podíl hemicelulózy ve dřevě pohybuje mezi 15–35 %. Mezi celulózovými vlákny se ukládá lignin, který nám tvoří také důležitou složku dřeva, díky stmelení se celulózová tkáň přeměňuje na tkáň dřevní. U jehličnatých dřevin lignin obsahuje 25–30 % a u listnatých dřevin je hranice 15–30% hmotnosti dřeva (Kučerová a Šimůnková 2000).

Díky dřevní hmotě je WPC pevný a tuhý, ale zároveň lehký materiál. Velká výhoda je i v nízké ceně a nízké hustotě. Přírodní charakter dřevní složky má dále výhodu v recyklovatelnosti a biologické rozložitelnosti (Lange 2013).

Dřevní hmota, tedy plnivo se používá v mnoha různých formách, které lze rozdělit podle velikosti částic ze dřeva na dřevní štěpky, dřevní piliny, dřevní krátká a dlouhá vlákna, dřevní moučka viz Obr. 7, volba jednotlivé formy má přímý vliv na vlastnosti, ale i výrobní technologii WPC výrobku (Niska a Sain 2008, Böhlm a kol. 2012, Lange 2013).

3.1.1.1.1. Dřevní vlákna

Za posilující část kompozitního materiálu jsou považována dřevní vlákna, která nesou vyšší zatížení z důvodu větší délky, přidávají se ke zvýšení tuhosti a pevnosti kompozitu. Pro větší imitaci dřeva se přidává větší podíl dřevěného vlákna, díky tomu jsou dobré mechanické vlastnosti směsi (protahování, pevnosti a odolnosti proti nárazu), avšak směs se obtížně zpracovává při kompaundaci (smíchání) z důvodu nízké objemové hustoty (Niska a Sain 2008, Böhlm a kol. 2012, Lange 2013).

3.1.1.1.2. Dřevní moučka

Oproti dřevním vláknům se dřevní moučka, snadněji zpracovává a získává poměrně vysokou objemovou hustotu, ale zároveň má menší mechanické vlastnosti (Niska a Sain 2008, Böhlm a kol. 2012, Lange 2013). Trísloviny, které jsou obsažené v moučce jsou tedy ve vodě dobře rozpustné, ale fenolové a polyfenolové sloučeniny mohou vytvářet tmavé skvrny ve výsledném produktu, nejvíce se tento problém vyskytuje u dubových vláken, kde jsou trísloviny obsaženy ve větší míře. Tyto skvrny se odstraňují přidáním aditiv založených na bázi kyseliny šťavelové, eventuelně na bázi jiné dikarboxylové kyseliny (Klyosov 2007).



Obr. 7 Formy dřevních částic (WoodflourMill 2019)
(Zleva: dřevní štěpka, dřevní piliny, dřevní vlákna, dřevní moučka)

3.1.1.2. Alternativní materiály

Dále se používají zbytky zemědělských rostlin (obilí, sláma), konopí, juta, kenaf (vlákna ibišku), rýžové slupky, bambus, papír, jako alternativa za dřevní hmotu. Méně časté je použití Řepky ozimé jako plnivo do WPC materiálu (Niska a Sain 2008, Lange 2013).

3.1.1.2.1. Rýžové slupky

Rýžové slupky (Obr. 8) tvoří cca 20 % celové hmotnosti hrubé rýže a vznikají jako vedlejší produkt při mletí rýže. Rýžové slupky jsou odděleny od rýžových jader za pomoci aspirace. Lze je použít jako alternativu plniva za dřevní hmotu. V USA produkce rýžových slupek se pohybuje okolo 1,25 mil tun ročně. Chemické složení slupek se podobá chemickému složení dřeva, zastupují jí tři základní složky celulózu (28 – 48 %), hemicelulózu (23 – 28 %), lignin (12 – 16%) a dále obsahuje i oxid křemičitý (19 %). Slupky jsou odolnější vůči mikrobiologickému rozkladu a pronikání vlhkosti oproti

dřevu, je to způsoben díky ligninu, který ve slupkách má větší podíl minerálních látek. (Klyosov 2007)



Obr. 8 Rýžové slupky (Depositphotos 2019)

3.1.1.2.2. Přírodní vlákna

Přírodní vlákna (Obr. 9) můžeme získat z konopí, kopřiv, juty, slámy, palem, bavlny, kokosových slupek. Tyto materiály se jako plnivo často nepoužívají je to z důvodu ekonomického hlediska, jelikož takto získaná vlákna jsou velmi drahá. Tuto alternativu k dřevní hmotě využívá jen pár společností ve světě. Navzdory vysoké ceně, vlákna mají kladný vliv na WPC materiál, jelikož vlákna jsou považována za výbornou výstužnou složku. Konopná vlákna v porovnání s dřevní moučkou mají vyšší pevnost v tahu i ohybu i modul pružnosti. Nevýhodu mají ve vysoké absorpci vlhkosti a následně v bobtnání. Další problém nastává při výrobě, kdy je potřeba umístit vlákna stejnoměrně, tak aby bylo docíleno vyšší pevnosti. Podíl celulózy (80 %) a ligninu (4 %) u těchto materiálu (Klyosov 2007).



Obr. 9 Vlákna z konopí (Ekostavivo 2019)

3.1.1.2.3. Řepka ozimá

Celosvětově je jednou z nejdůležitějších olejnin, pěstuje se především pro potravinářský a krmivářský průmysl a také pro výrobu biopaliv. Je snaha vyrábět z posklizňových zbytků řepky kompozitní materiály a materiály pro konstrukční účely. V České republice se produkce řepky od roku 1990 do roku 2017 více jako ztrojnásobila udává Český statistický úřad, ale i ve světě produkce řepky stoupá, mezi největší pěstitelé řepky patří Kanada, Indie, Čína, Francie a Německo (Hýsek 2018).

Řepka je buď jednoletá nebo dvouletá rostlina, může dosahovat výšky až dva metry a stonek je často rozvětvený. V porovnání se dřevem jsou řepková vlákna více heterogenní, z důvodu toho, že rostlina obsahuje více druhů buněk. Podle chemického složení stonek řepky obsahuje 41% celulózy, 23,4% hemicelulózy, 21,5% ligninu, 6,8% extraktiv a 5,8% popelovin. Chemické složení jednotlivých vláken je 61,3% celulózy, 13,9% hemicelulózy, 5,2% ligninu, 1,9% extraktiv a 4,8% popelovin. Řepková vlákna obsahují velký podíl celulózy a lze z nich mechanickým způsobem vyrobit celulózová nanovlákna a následně z nich je vyroben nanopapír a pomocí částečného rozpuštění vláken byl vyroben kompozitní materiál (Hýsek 2018).

Z řepky je snaha vyrábět kompozitní materiál WPC, vyrobený pomocí lisování z polyetlenu s nízkou hustotou a plniva ve formě prášku z řepkových stonků. Pevnost v ohybu klesá s větším obsahem plniva (řepkového prášku) naopak modul pružnosti v ohybu stoupá. S větším obsahem řepkového prášku v konečném výrobku dále se také zvyšuje nasákavost a bobtnání (Hýsek 2018).

3.1.1.3. Polymer

Druhy pojiva podle použití můžeme rozdělit polymery na termoplastické a reaktoplastické. Termoplastické polymery vytvářejí amorfní i krystalickou strukturu a mají možnost opakovaně převést do stavu taveniny či viskózního toku za pomoci ohřevu a následně jejím ochlazením převést zpět do pevného stavu. Zatím co reaktoplasty po vytvrzení jsou netavitelné a následné recyklační postupy jsou obtížnější. Reaktoplasty procházejí při zpracování chemickou reakcí, vytvářejí husté a prostorově zesíťované struktury v nichž jsou původní molekuly navzájem propojeny kovalentními vazbami za pomoci účinku tepla, záření či síťových činidel. Nevýhodou při zpracování WPC je

teplota, z důvodu teplotní stability dřeva. Teplota, při které dochází k tavení plastu musí být vyšší než teplota degradace dřeva. Teplota je tedy omezená, a proto WPC směsi se zpracovávají při teplotách do 220°C. Tato teplota, ale může klesat při větším podílu dřevní složky. Mezi nejběžněji používanými termoplasty pro výrobu WPC jsou polyvinylchlorid (PVC), polyetylén (PE), polypropylen (PP), polystyrén (PS), nízko-hustotní polyetylén (LDPE), vysoko-hustotní polyetylén (HDPE), kopolymer akrylonitril-butadien-styren (ABS) či jejich recykláty (Lange 2013). Další nevýhodou při zpracování je špatná kompatibilita polymerní maticí a dřevními vlákny, to vede k nerovnoměrné disperzi a vyplívají z toho špatné mechanické vlastnosti WPC. Polymery a dřevo z hlediska chování můžeme přirovnat k oleji a vodě, složky obou materiálu se nechtějí smíchat, z důvodu polarity. Větší část termoplastických polymerů, jsou hydrofobní tzv. vodu odpuzující látky. Z toho vyplívá špatná přilnavost mezi dřevními vlákny a polymerem v materiálu WPC. Nejčastěji využívány polymery jsou polyvinylchlorid, polyetylén a polypropylen (Bouafif a kol. 2009).

3.1.1.3.1. Polyvinylchlorid

Polyvinylchlorid zkratkou označovaný PVC, patří k nejvyužívanějším vyráběným termoplastem, z důvodu levné výroby a jeho vlastnostech. Lze zpracovat všemi základními postupy (válcování, vstřikováním, vyfukováním, vakuováním) a má schopnost želatinovat se změkčovadly. Výsledné vlastnosti PVC polymeru závisí na zvoleném způsobu výroby a v případě použití různého typu změkčovadla, kdy výsledný polymer získává měkkost a pružnost. Další velkou výhodou PVC je vysoká chemická odolnost. Běžný typ polyvinylchloridu jak název napovídá obsahuje cca 50 % chlóru, při vysokých teplotách nad 160 °C se uvolňuje chlór, který je vysoce zdravotně závadný (Ducháček 2011, Filipy 2013).

3.1.1.3.2. Polyetylén

Polyetylén zkratkou označovaný PE, patří k nejjednodušším plastickým hmotám, jedná se o termoplast, který se používá jako pojivo pro výrobu WPC desek. Jedná se o látku vyrobenou polymerací s parafinovým vzhledem a typickým mléčně bělavým zákalem, hmota je částečně houževnatá, pružná a krystalická. Příčina charakteristického zákalu u této hmoty je způsobená krystalinitou polyetylenu, která zapříčiňuje sníženou propustnost světla. Zahřívání polyetylenu hmota měkne a následným tavením krystalické fáze, opouští charakteristický mléčně bílý zákal a s postupně klesající viskozitou se

tavenina ve které vznikají bublinky, dostává do teploty rozkladu a z jejího povrchu se začíná odpouštět bílý dým (Ducháček 2011, Filipy 2013).

Se zvyšující krystalinitou se zvyšuje chemická odolnost polyetyleny. Nepříznivou vlastností polyetylenu je nerozpustnost v organických rozpouštědlech. V běžných teplotách vzdoruje polyetylén polárním rozpouštědlům, zásadám, neoxidujícím kyselinám, vodě, solím a jejich roztokům. U vyšších teplot nepolárních rozpouštědlech je odolnost polyetylenu velmi omezená (Ducháček 2011, Filipy 2013).

Polyetylén se rozděluje z hlediska rozvětvení makromolekul na dva základní hlavní druhy, lineární (vysoko - hustotní) a rozvětvený (nízko - hustotní). V nízkých teplotách má polyetylén vynikající odolnost, křehne až při $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Produkty vyrobené pojiva lineárního polyetylenu jsou stále do více než $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotu tání mají v rozmezí 120 až $135\text{ }^{\circ}\text{C}$, u rozvětveného polyetylenu jsou teploty nižší a produkty jsou tedy tvarově stále asi do $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplotu tání mají v rozmezí 105 až $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ducháček 2011, Filipy 2013).

Polyetylén se využívá nejen na výrobu WPC desek, ale i na výrobu izolace, obalů, fólií, elektrických kabelů, kanystru, trubek, hraček, výrobků pro domácnost. PE nachází uplatnění jak u technických výrobků (Ducháček 2011, Filipy 2013).

3.1.1.3.3. Polypropylen

Polypropylen označován zkratkou PP, je vyráběn pomocí polymerace, jedná se o chemickou reakci velkého množství molekul monomeru, z nichž vznikají dlouhé makromolekuly polymeru. Tepelná stabilita polypropylenu je zachována do $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ a teplota tání je v rozmezí 160 až $170\text{ }^{\circ}\text{C}$, teplotní rozklad je nad teplotu $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, když polymer je touto teplotou vystaven dlouhodobě. PP se využívá ve zdravotnickém a potravinářském průmyslu z důvodu zdravotní nezávadnosti. Nevýhoda polypropylenu je vysoká hořlavost (Ducháček 2011, Filipy 2013).

3.1.1.4. Aditiva

Další přidanou složkou do WPC materiálů jsou aditiva (přísady) z důvodu zlepšení procesu zpracování a vlastnostech (fyzikálních, mechanických, estetických) konečného výrobku (Niska a Sain 2008, Lange 2013). Obecně platí, že aditiva přispívají

ke splynutí hydrofilního dřeva a hydrofobního plastu, které umožňují tvorbu jednofázového kompozitu (Wechsler a Hiziroglu 2007).

WPC lze upravovat dodáním přísad, které se podílejí na ochraně materiálu a zvyšují také parametry, jako je odolnost proti biotickým škůdcům. Na WPC materiálu není nutné realizovat výrazně pravidelnou údržbu ošetřováním a nátěry v porovnání s rostlinným dřevem, kde údržba musí být pravidelná a častá (Niska a Sain 2008, Kratochvíl a kol. 2005). Přísady, které vyžaduje technologie jsou maziva a kompatibilizéry. Ostatní přísady ovlivňují spojení vstupních surovin a dodávají materiálům unikání vlastnosti, mezi ně patří například minerály, modifikátory, tepelné stabilizátory, barviva, UV stabilizátory, retardéry hoření a biocidy, změkčovadla a plastifikátory, pigmenty a další (Niska a Sain 2008, Lange 2013).

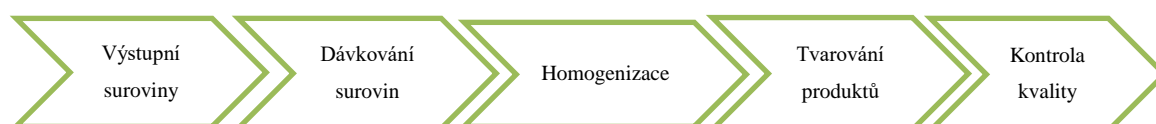
Přísady a jejich důvod použití:

- Kompatibilizéry: zdokonalují přilnavost obou základních složek mezi plnivem a matricí (dřevní hmota a termoplastický polymer). Přilnavost je elektrostatický jev mezi povrchem dvou materiálů. V současnosti se využívá jako kompatibilizér modifikovaný jílem a roubovaný polypropylen. Kompatibilizér zvyšuje i mechanické vlastnosti, u WPC materiálu s polypropylenovou matricí se udává, že pevnost v tahu je o 12% vyšší a pevnost v tahu za ohybu o 15% vyšší (Niska a Sain 2008).
- Stabilizátory: mají specifickou funkci, jsou schopny totiž zpomalit degradaci polymerů a zvýšit životnost polymeru. Dělí se na tepelné a světelné.
- Retardéry hoření: jedná se o důležité přísady do WPC materiálu, z důvodu zabraňující zapálení polymeru nebo zpomalující proces hoření po vzplanutí, ale i omezující vznik toxických zplodin a kouře při hoření materiálu (Niska a Sain 2008).
- Barevné pigmenty: dělí se podle báze na organické pigmenty, anorganické pigmenty a práškové kovy a bronzy. Nejsou rozpustné v polymerech. Dodávají polymerům požadované zbarvení. Rozhodující vlastnost pigmentů je tepelná stálost na světle a kvalita barevného odstínu (Ducháček 1999).

- Maziva: usnadňují zpracování a snížení viskozity polymerů. Zvyšují odolnost proti povětrnostním vlivům a světelnou a tepelnou stabilitu (Niska a Sain 2008).
- Stabilizátory: mají specifickou funkci, jsou schopny totiž zpomalit degradaci polymerů a zvýšit životnost polymeru. Dělí se na antioxidanty a UV stabilizátory.
 - Antioxidanty: zpomalují tepelně-oxidační stárnutí, při vysokých teplotách na přímém slunci se zamezí poškození polymerů.
 - UV stabilizátory: zabraňují k částečnému pronikání UV záření, které způsobuje degradaci polymeru (Niska a Sain 2008).

3.1.2. Výroba WPC

Složky (dřevní hmota, polymer) ze kterých je vyrobený WPC materiál mají výhody a nevýhody. Do výhod řadíme trvanlivost, tepelný odpor, dobrá dostupnost, mechanické vlastnosti. Postup výroby WPC materiálu je uveden na Obr. 10, skládá se z několikastupňového procesu. Vstupní suroviny se nejprve musí dostatečně smísit tzv. homogenizovat a poté se výrobní technologii tvarují do konečného produktu (Niska a Sain 2008).



Obr. 10 Schéma postupu výroby WPC materiálu (Autor)

Dřevní hmota stejně jako polymery jsou skladovány v silech nebo plastových nádobách. Při manipulaci může vznikat dřevní prach a může dojít k jiskření, jelikož prachové částice dřevní hmoty jsou snadno vznítitelné. Přeprava dřevní hmoty může být uskutečněna prostřednictvím dopravníků: šnekové dopravníky, pásové dopravníky, pneumatické dopravníky či vibrační dopravníky (Niska a Sain 2008).

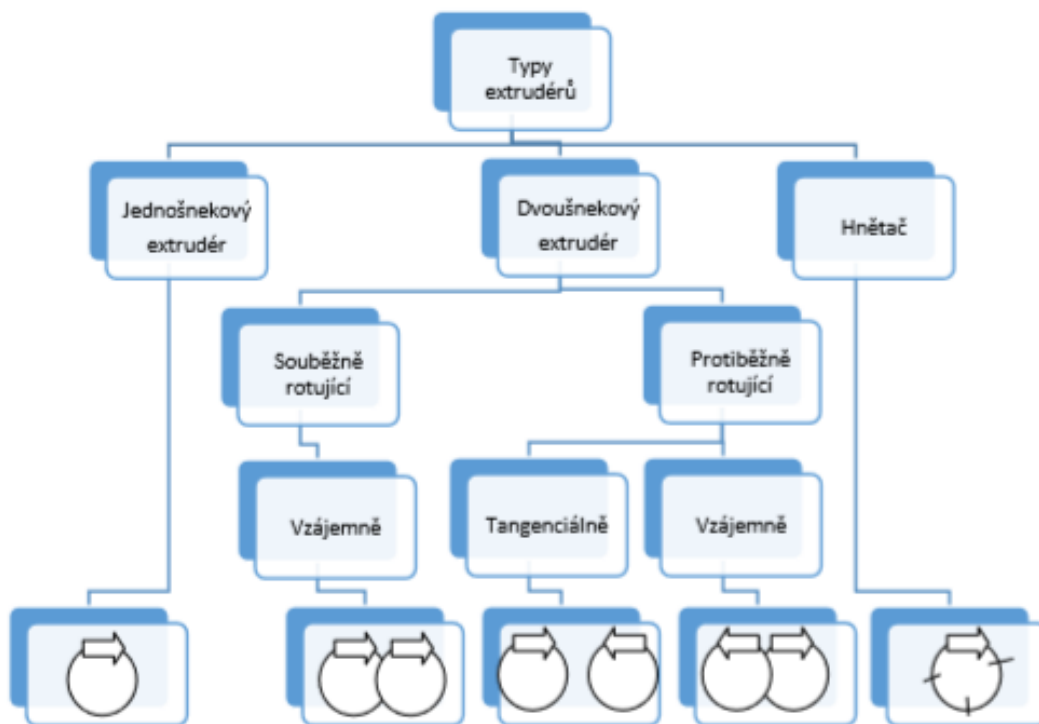
Proces výroby WPC materiálu obsahuje tři základní fáze:

- zpracování surovin
- promíchání (homogenizace) surovin
- tvarování produktu:
 - vstřikováním
 - extruzí (vytlačováním) profilů
 - lisováním.

První fáze výroby je zpracování dřevního materiálu, dochází k rozdělení různých velikostí a druhů vláken a jejich sušení. V další fázi je homogenizace směsi, která se provádí extruzí na šnekovém extrudéru. Cílem smíchání vstupních surovin (dřevní složky, polymerů, přísad) je homogenizace směsi, tak aby jednotlivé suroviny byly dokonale promíchány a vznikla jednotná směs, tedy homogenizovaný granulát (Obr. 11), který dále pokračuje do další fáze výrobního procesu. Výběr vhodného typu extrudéru záleží na způsobu výroby a typem konečného produktu. V dnešní době je mnoho různých způsobů homogenizace WPC materiálu (Obr. 12), výrobní stroje pochází z výroby polymerů, kde také dochází k výrobní fázi vytlačování směsi (Niska a Sain 2008).



Obr. 11 Granulát WPC materiálu (Flour Wood 2019)



Obr. 12 Rozdělení typů extrudéru (Bláha 2016)

Jednotlivé typy extrudérů se používají podle požadavků. Pokud musíme mít přesné vytlačování profilů, využijeme jednošnekový nebo protiběžný dvoušnekový extrudér. Pokud máme požadavky na dobré pomletí surovin a vytěsnění přebytečného vzduchu, použijeme souběžný dvoušnekový extrudér (Niska a Sain 2008).

Dalším krokem výrobního procesu je tvarování produktu, za pomoci vstřikování, vytlačování nebo lisování (Niska a Sain 2008).

Vstřikování probíhá za pomoci hydraulicky tlačených šnekových dopravníků, kde se nachází roztavený polymer a ten je vstřikován do formy v upínacím stroji. Šnekový dopravník je vybaven i odplyňovací funkcí. Tak aby se předešlo povrchovým vadám výsledného produktu musí mít smíchané WPC nízký obsah vlhkosti (Niska a Sain 2008).

Tvarování produktu za pomoci vytlačování se vyrábí široký sortiment polotovarů (desky, profily, trubky, dráty). Vytlačování probíhá za pomoci šnekových válců. Mezi ně patří jednotlivé šnekové válce a protiběžné dvojice šnekových válců či souběžné dvojce šneků. Hlavní výhodou šnekových válců je vysypání směsi přímo z násypky, tak že se

nepoužívají žádné dopravníky. Materiál je zahříván na teplotu 110 – 130 °C nebo 160 – 180 °C záleží na výsledném produktu (Niska a Sain 2008).

Lisování desek probíhá za pomoci dvoj-pásovém lisu nebo mezi dvěma válci. Lisování mezi dvěma válci se používá pro tloušťky desek menší než 6 mm. Dvoj-pásový lis se používá pro tloušťky nad 6mm a pro hrubší profily WPC materiálu, jelikož desky se při chlazení neohýbají. Systém rolovacích válců se skládá z dvou dolních a jednoho horního válce, všechny tři válce jsou chlazené. Dvoj-pásový lis se dokáže využít na dva typy výroby buď vytápění a chlazení nebo jen chlazení. Lis se může dále využít pro speciální aplikaci povrchových vrstev (Niska a Sain 2008).

3.1.3. Vlastnosti materiálu

Vlastnosti materiálu lze rozdělit na fyzikální a mechanické vlastnosti

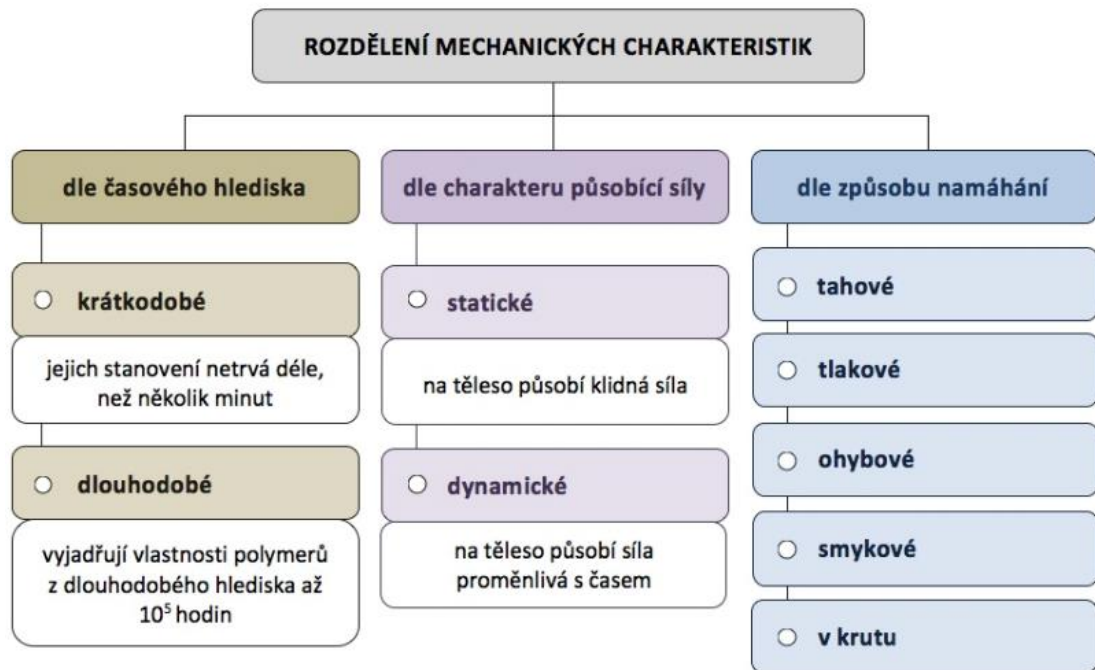
3.1.3.1. Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti lze zkoumat bez zásahu do chemického složení či celistvosti posuzovaného tělesa.

Fyzikální vlastnosti rozdělujeme na vnější a vnitřní vlastnosti. Do vnějších patří barva, lesk, textura, vůně. Do vnitřních patří hustota, vlhkost, propustnost, tepelné vlastnosti, zvukové vlastnosti, elektrické vlastnosti (Požgaj a kol. 1997, Gandelová a kol. 2009).

3.1.3.2. Mechanické vlastnosti

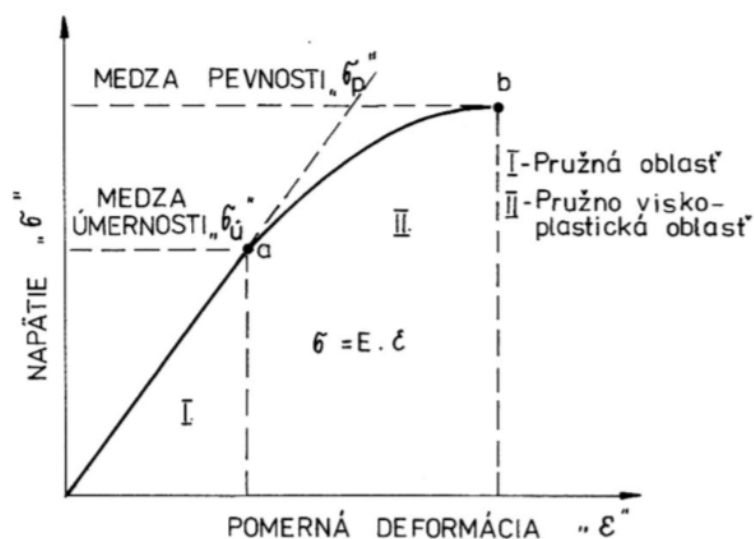
Mechanické vlastnosti materiálu určují schopnost materiálu odolávat působení vnějších sil (Gandelová a kol. 2009). Mechanické charakteristiky lze rozdělit z několika hladin (Obr. 13).



Obr. 13 Schéma rozdělení mechanických charakteristik (Publi 2019)

Schéma poukazuje na to, že jednotlivé rozdělení je vzájemně propojeno. Namáhání je buď statické (síla působí na materiál v klidu) nebo dynamické (působící síla mění směr i velikost). Důsledek tohoto namáhání způsobuje dočasné nebo trvalé změny tvaru tělesa. Do děje se někdy přidávají i ostatní fyzikální síly (vlhkostí, tepelné, a další) nejen mechanické. Pro konstrukční prvek se využívá kombinace zatížení mechanického a vlhkostního, v tomto případě záleží i na faktoru času. Mezi základní vlastnosti patří pevnost, pružnost, plastičnost, houževnatost do odvozených vlastností jsou zařazené tvrdost, odolnost proti trvalému zatížení, odolnosti proti tečení a odolnosti proti únavovému lomu (Požgaj a kol. 1997).

Vnější mechanické síly vyvolají vnitřní síly v tělese, které se nazývají napětí. Reakci na působení vnějších mechanických sil se projevuje na materiálu deformace, což je změna tvaru a rozměrů materiálu. Vztah mezi napětím a deformací, ze kterého vznikají informace o dřevě, kompozitních materiálech a materiálech na bázi dřeva v dřevěných konstrukcích nám vyobrazuje pracovní diagram (Obr. 14), ve kterém lze pozorovat, jaký vliv má rostoucí napětí na průběh deformace (Požgaj a kol. 1997).



Obr. 14 Pracovní diagram (Zlomková 2019)

Pracovní diagram je rozdělen na dvě části za pomoci křivky na část lineární (vyobrazená do meze úměrnosti), které vznikají pružné deformace, kdy namáhané dřevo se vrátí do původního tvaru. Druhá část se nazývá nelineární (vyobrazená od meze úměrnosti do meze pevnosti) a vznikají zde deformace pružné v čase kdy se dřevo nevrátí do původního stavu okamžitě, ale až za určitý čas a plastické deformace, kdy se těleso trvale deformuje (Požgaj a kol. 1997).

Vnitřní odpor materiálu vůči pružné deformaci vyjadřuje modul pružnosti. Vztah mezi modulem pružnosti a napětím je, že při zvětšení modulu pružnosti se zvětší i napětí potřebné k deformaci materiálu. Moduly pružnosti se rozdělují na normálové namáhání (tah, tlak, ohyb) a tangenciální namáhání (smyk, kroucení) (Požgaj a kol. 1997, Gandelová a kol. 2009).

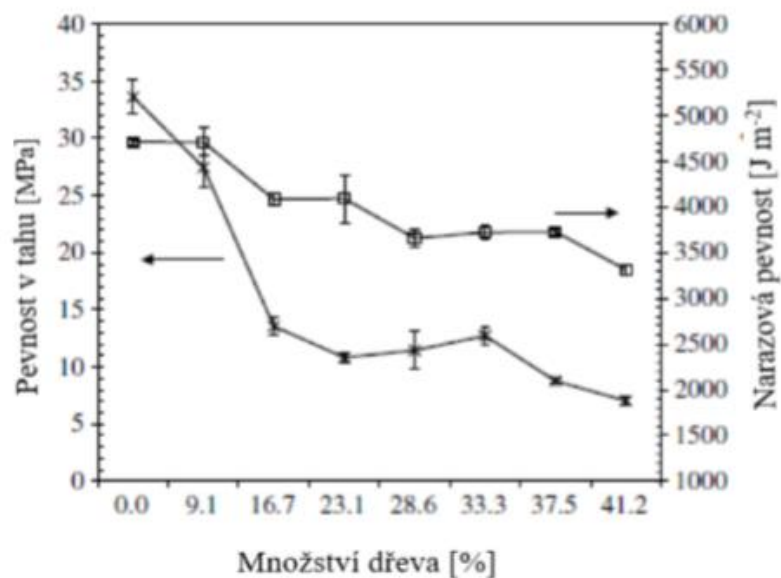
3.1.3.3. Fyzikální a mechanické vlastnosti WPC

Fyzikální a mechanické vlastnosti dřevoplastu závisí na několika faktorech, jako je poměr objemu a velikosti celulózových vláken, adheze polymerů a vláken, technologické zpracování, doba míchání a teplota při zpracování výsledné hmoty (Sombatsompop a kol. 2003).

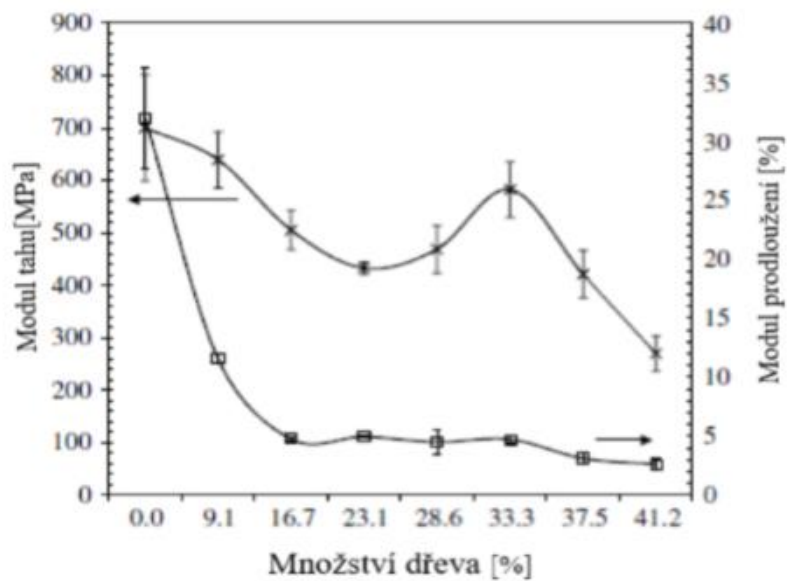
Avšak čím více je množství dřevní složky v celkovém poměru výsledného materiálu, tím více má celkový vliv na tepelné, mechanické a dielektrické vlastnosti

(Sombatsompop a kol. 2003). S větším obsahem dřevní složky se zvyšuje i modul pružnosti, ale zároveň dochází ke snížení pevnosti kompozitního materiálu (Buschow a kol. 2001). U použití dřevní moučky jako plniva se zvyšuje modul pružnosti z důvodu malé velikosti jednotlivých částic (Klyosov 2007). Nejen ale poměr dřevní složky ovlivňuje výsledný kompozitní materiál z velké části ho také ovlivňuje vlastnost termoplastického polymeru, který také podléhá degradujícím atmosférickým vlivům (Niska a Sain 2008).

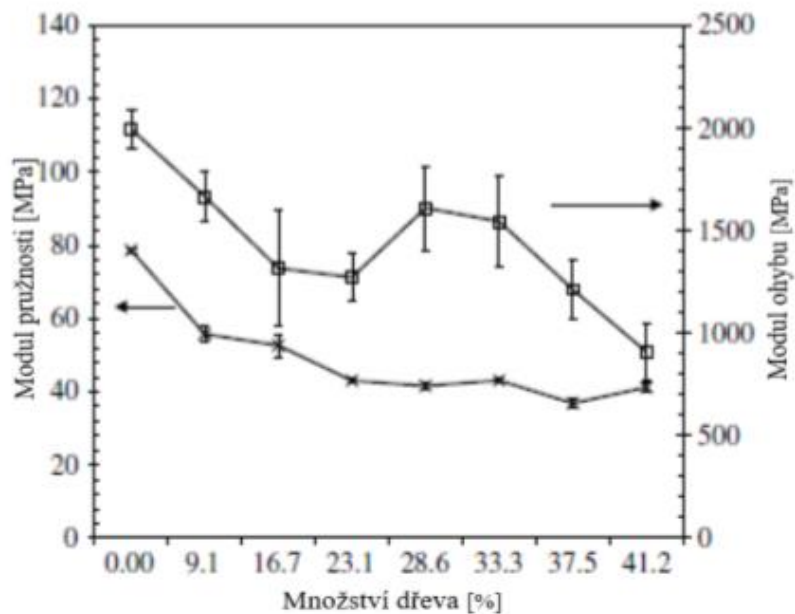
Pokud bychom porovnávali mechanické vlastnosti WPC materiálu se smrkovým dřevem tak z Obr. 15 - 18 a Tab. 1 je patrné, že kompozitní materiál má pokaždé horší mechanické vlastnosti, ovšem jen tehdy pokud je dřevo namáháno ve směru vláken. Pokud bylo dřevo namáháno kolmo na směr vláken má v některých případech WPC materiál lepší vlastnosti než smrkové dřevo. Výsledky namáhání dřeva v ohybu jsou lepší než u WPC kompozitního materiálu (Dolejší 2019).



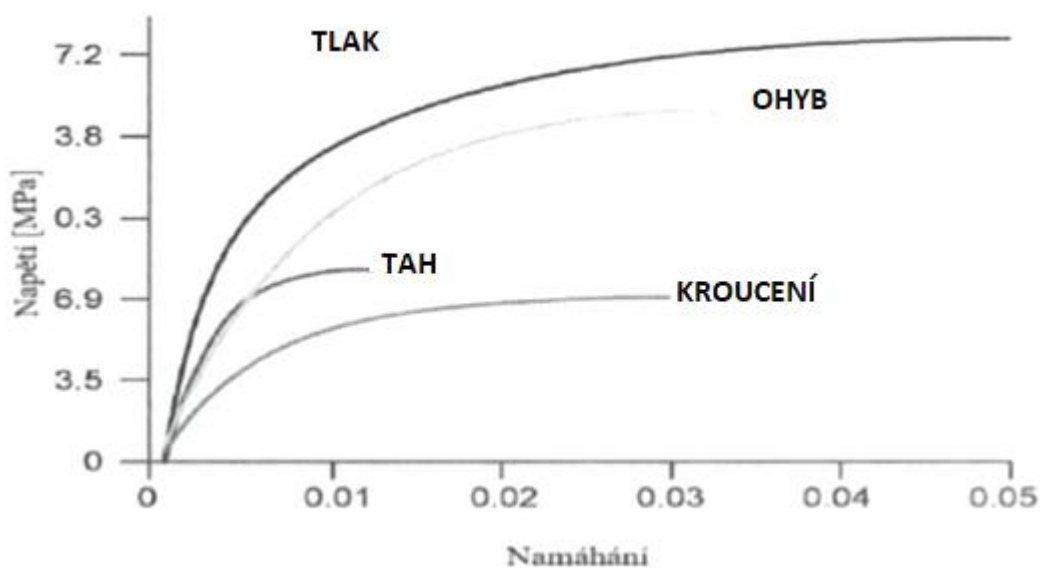
Obr. 15 Vliv obsahu dřevěných pilin na pevnost v tahu a nárazu (Sombatsompop a kol. 2003)



Obr. 16 Vliv obsahu dřevěných pilin na pevnost v tahu a nárazu (Sombatsompop a kol. 2003)



Obr. 17 Vliv obsahu dřevěných pilin u modulu ohybu a pružnosti (Sombatsompop a kol. 2003)



Obr. 18 Mechanické vlastnosti WPC materiálu v závislosti deformace na napětí
(Niska a Sain 2008)

Tab. 1 Mechanické vlastnosti smrkového dřeva o vlhkosti 12% (Wolcott a kol 2004)

Materiál	Namáhání	Pevnost v tahu ve směru vláken (MPa)	Pevnost v tahu kolmo na vlákna (MPa)
Smrkové dřevo s vlhkosti 12 %	Tlak	34,1	3,4
	Tah	74,4	2,2
	Ohyb	70,4	72

Nasákavost kompozitního WPC materiálu je závislá na výsledných vlastnostech, protože absorpce vody negativně ovlivňuje vlastnosti tohoto materiálu. Absorpce vody u kompozitu záleží na pórovitosti, obsahu celulóзовého vlákna a přístupnosti k vodě. Čím větší pórovitost a koncentrace dřevních částic tím větší absorpce vody (Koubaa a kol. 2009). Může totiž nastat několik případů deformace, jako je změny rozměrů (zvětšení), prohnutí, či snížení ohybového modulu. V důsledku vody nevzniká jen deformace, ale může vznikat i plísně a jejich šíření, jelikož voda je součástí mikrobiálního života. Materiály s vlhkostí pod 19%, nepodporují růst plísním. Důvod absorpce vody je poréznost kompozitního dřevoplastového materiálu, jelikož směsi WPC materiálu zaznamenávají celulózu, která obsahuje vlhkost. Nasákavost WPC materiálu

v porovnání se dřevem je výrazně nižší (Prachayawarkorn a kol. 2006, Ducháček 2019). Zlepšení mechanických vlastností WPC materiálu lze docílit přidáním skelných vláken, zvláště je vidět zlepšení u pevnosti v tahu a odolnosti nárazu (Semeralul a Rizvi 2009).

3.1.4. Využití WPC

Hlavními důvody pro využívání dřevěných materiálů a kompozitních materiálů na bázi dřeva pro konstrukční účely jsou kladné vlastnosti dřeva, jedná se o lehký, snadno opracovatelný materiál s dobrými izolačními vlastnostmi. Srovnání poměru nízké objemové hmotnosti a vysoké pevnosti zabezpečuje dřevu výborné podklady pro použití v konstrukcích, avšak dřevo má i záporné vlastnosti, které nelze vynechat. Je hydrofobické, tzv. změny rozměrů při změně vlhkosti. Má anizotropní charakter, tzv. v jednotlivých směrech má odlišné fyzikální a mechanické vlastnosti. Dřevo jako konstrukční materiál je také charakteristické vysokou biodegradací a ztrátou mechanických vlastností. Dřevo tedy musí být dobře ošetřeno, tak aby se částečně dokázalo zabránit hnilobě a plísním nebo barevným změnám. Jako náhradu za přírodní materiál vzniklo již několikrát zmíněný materiál WPC. Jedná se o recyklovatelný materiál s dlouhou životností a s nízkými požadavky na údržbu. WPC materiál je tedy dobrou alternativou používání materiálu ve stavebnictví. Kdy pro snadnější montáž jsou ve dřevoplastovém dílci, již od výrobce poskytnuty drážky či úchyty a tím umožňují materiálu lehčí uchycení jednotlivých prvků např. terasy (Niska a Sain 2008, Böhm a kol. 2012).

Nevýhodou kompozitního WPC materiálu může být na začátku barevná nestálost, tedy dochází ke změnám barvy materiálu, avšak tento aspekt se po několika týdnech na rozdíl od dřeva stabilizuje a barva se tedy nadále nemění. Další nevýhodou dřevoplastového materiálu je vyšší pořizovací cena, z důvodu k ceně údržby dřeva se vložené finanční prostředky do WPC materiálu v celkovém výsledku vrátí (Niska a Sain 2008).

Materiál WPC má široké možnosti uplatnění jako imitace dřeva v místech vysokého namáhání. Z důvodu dlouhodobé trvanlivosti a dobrých mechanických vlastností, odolnosti vůči vnějším vlivům, tepelně-fyzikálních vlastnostech, tvarové stálosti se využívá především v exteriéru. Například v podobně zahradních terasových

podlah, plotovek (Obr. 19), obložení prostoru okolo bazénu (Obr. 20), obložení venkovních schodů, střešní krytiny, fasádní profily, plotovky, nábytku, či výroba lodí. Další výhodou WPC materiálů je minimální údržba a snadná čistitelnost výsledných produktů (Niska a Sain 2008, Böhlm a kol. 2012).

Charakteristika WPC materiálu poskytuje kromě plnostěnných profilů vyrábět i prvky vylehčené dutinami, využívá se například u fasádních profilů (Jakubčík 2017). Při nevhodně provedené montáži dutých profilů, se může snížit odolnost vůči mrazu, z důvodu zatékáním vody a následným prasklinám v důsledku rozpínání ledu (Böhlm a kol. 2012).



Obr. 19 Plot z materiálu WPC (Magoya 2019)



Obr. 20 Terasa u bazénu z WPC (Flour Wood 2019, Art bazény 2019)

4. Metodika

Experimenty na WPC materiálu se zaměřením na mechanické charakteristiky probíhaly v rámci projektu a spolupracovalo na nich více diplomantů. Veronika Křenková naměřila hodnoty ohybové charakteristiky (hodnoty modulu pružnosti a meze úměrnosti) před vlivem umělého stárnutí a Barbora Belková prováděla proces umělého stárnutí a naměřila hodnoty ohybové charakteristiky po umělém stárnutí a zpracovala statistické vyhodnocení.

4.1. Vstupní materiál

Pro tuto práci bylo připraveno pět variant vzorků, které dodala firma Plastic Two, a.s. Jednotlivé vzorky se odlišují z hlediska použití plniva, kde jsou použity následující dřeviny, dub a exotická dřevina teak. V jedné variantě vzorků byla použita i alternativa za dřevní hmotu v podobě řepky ozimé (Obr. 21).



Obr. 21 Varianty používaného WPC materiálu (Autor)

Pro tento výzkum byly vybrány duby, běžně sázené listnaté dřeviny v České republice, které ovšem měly velmi špatnou jakost a byly by jinak odpadními dřevinami. Teak, exotické dřevo, byl zvolen z důvodu poměření. Dále vybrané dřeviny jsme

následně porovnávali s alternativními materiály, kdy se využívá několik druhů alternativních materiálů. Jednotlivé druhy WPC materiálů byly připraveny v podílovém složení, které je vyznačené v Tab. 2. Byla zvolena pro Českou republiku běžně pěstovaná řepka ozimá, ze které se zpracovaly pro výrobu WPC pouze stonky.

Tab. 2 Materiálové složení používaného WPC materiálu

Varianta	Pracovní označení vzorků	lignocelulózný materiál	podíl LC
1	WPC-řepka	stonky řepky	38%
2	WPC-dub 1	dub	58%
3	WPC-dub 2	dub	58%
4	WPC-dub 3	dub	58%
5	WPC-teak	teak	58%

Jako pojivo byl vybrán nejčastěji využívaný polyetylén a tento polymer jsme využili ve všech pěti variantách WPC materiálu. Podíl aditiv zůstává pro všechny varianty WPC materiálů stejný (Tab. 3).

Tab. 3 Podílové složení plastu a aditiv používaného WPC materiálu

Varianta	Pracovní označení vzorků	plast	podíl plastu	podíl aditiv
1	WPC-řepka	PE	50%	12%
2	WPC-dub 1	PE	30%	12%
3	WPC-dub 2	PE	30%	12%
4	WPC-dub 3	PE	30%	12%
5	WPC-teak	PE	30%	12%

V aditivech bylo různé složení jednotlivých složek. Výrobní technologii firma nezveřejňuje, jelikož se jedná o produkty sloužící pro komerční účely. U jednotlivých druhů WPC materiálů používá jinou pigmentaci. Pouze u materiálu WPC-řepka uvádí, že je bez pigmentace. U čtyřech variant WPC materiálů nebyla povrchová úprava, pátá varianta byla s broušenou povrchovou úpravou (Tab. 4).

Tab. 4 Rozdělení WPC materiálu z hlediska použití barviva a povrchové úpravy

Varianta	lignocelulózový materiál	barvivo	povrch
1	stonky řepky	žádné	nebroušený
2	dub	hnědé	nebroušený
3	dub	oranžové	nebroušený
4	dub	černé	nebroušený
5	teak	červené	broušen

4.2. Experimentální část

Vzorky byly po patnácti kusech od každého druhu materiálu. Vzorky první varianty ze stonku řepky byly dodány ve dvou rozměrových kategoriích cca 16 x 340 x 19 mm a 15 x 340 x 49 mm. Ostatní čtyři varianty vzorků byly dodány v jedné rozměrové kategorii cca 15 x 340 x 49 mm.

U všech vzorků byla změřena na třech místech délka, šířka, tloušťka. Všechny tři rozměry byly následně aritmeticky zprůměrovány. Poté byly vzorky zváženy. Veškeré měření i vážení bylo naměřeno před umělém stárnutí a následně po umělém stárnutí.

4.3. Umělé stárnutí WPC materiálu

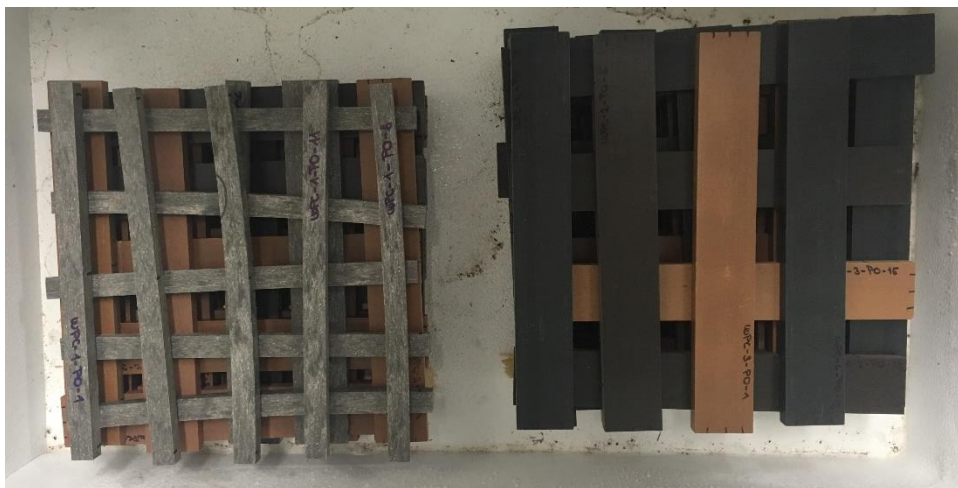
Umělé stárnutí kompozitního materiálu bylo provádělo dle normy ČSN EN 321 (2002), která uvádí zkoumání umělého stárnutí ve třech cyklech. Abychom dosáhli přesnějšího výsledku zkoumání po umělém stárnutí WPC materiálu, provedli jsme deset cyklů umělého stárnutí. Jeden cyklus probíhal 24 hodiny a byl složen ze dvou částí. První část cyklu byla prováděna uložením vzorku na 12 hodin do mrazícího boxu s teplotou -25 °C, následně byly vzorky vyndány a po hodině následovala druhá část cyklu, kdy vzorky byly vloženy do horkovzdušné sušící komory a zde probíhalo 12 hodin sušení při teplotě 70 °C. Typ umělého stárnutí za pomoci mrazícího boxu a sušící komory byl zvolen z důvodu měření mechanických vlastností, kdy jsme nemuseli brát v potaz UF faktor, který patří do fyzikálních vlastností materiálů, z tohoto důvodu neprobíhalo umělé stárnutí v peci.

Byl použitý mrazící box značky Liebherr LGT 3725 (Obr. 22), který je určen pro laboratorní účely, s objemem 342 l a digitálním ukazatelem teploty, kterou lze nastavit v rozmezí -10°C - 45°C (Expert 2019).



Obr. 22 Mrazící box Liebherr LGT 3725 (Autor)

V mrazícím boxu při teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ byly rozloženy na 12 hodin vzorky do dvou sloupců (Obr. 23), byly kladeny křížem tak, aby nebránily prostupnosti vzduchu. Jednotlivé vzorky byly při každém cyklu promíchány, aby se dosáhlo optimálních výsledků zkoumání.



Obr. 23 Uložení vzorku do mrazícího boxu (Autor)

Po první části cyklu, byly vzorky vyndány z mrazícího boxu a následně byly rozloženy na stůl v laboratorních podmínkách, kde byly umístěny na jednu hodinu. Poté

vzorky putovaly na druhou část cyklu do horkovzdušné sušící komory značky Memmert (Obr. 24), kde se sušily při teplotě 70 °C po dobu 12 hodin.



Obr. 24 Horkovzdušná sušící komora Memmert (Autor)

V sušící komoře byly jednotlivé vzorky opět stohovány křížem do jednoho velkého sloupce (Obr. 25). Jednotlivé vzorky při každém cyklu byly promíchány, stejně jako u uložení v mrazícím boxu.

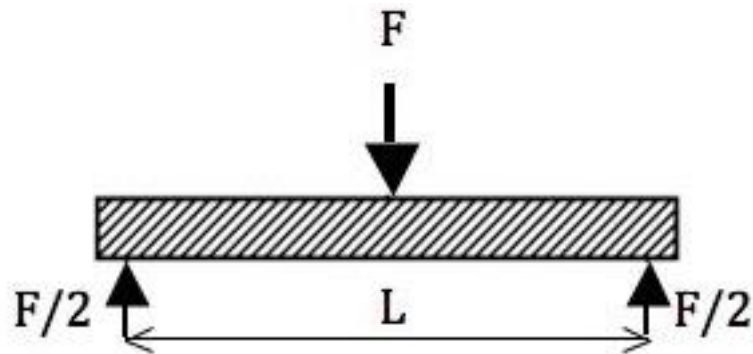


Obr. 25 Rozložení vzorků v horkovzdušné sušící komoře (Autor)

4.4. Ohybové charakteristiky WPC

Při zkoušce mechanické charakteristiky pro stanovení modulu pružnosti v ohybu se vycházelo z normy ČSN EN 310 (1995). Zkouška byla prováděna na trhacím stroji Tira TT2850S E58 s certifikací Evropské unie.

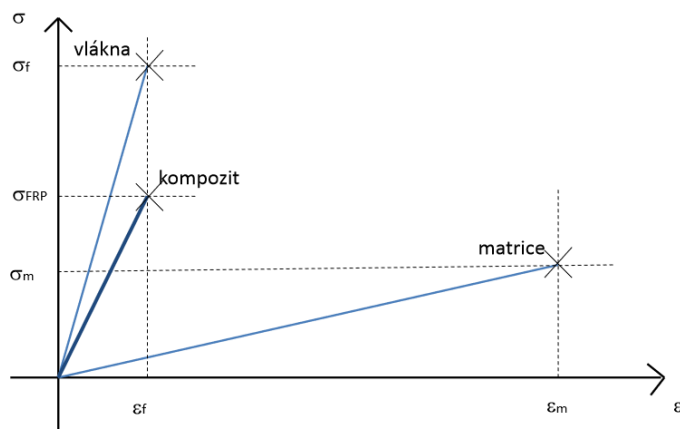
Zkouška byla prováděna za pomoci třibodového statického ohybu (Obr. 26).



Obr. 26 Schéma třibodového statického ohybu (Zlomková 2019)
(F – síla, L – vzdálenost podpěr)

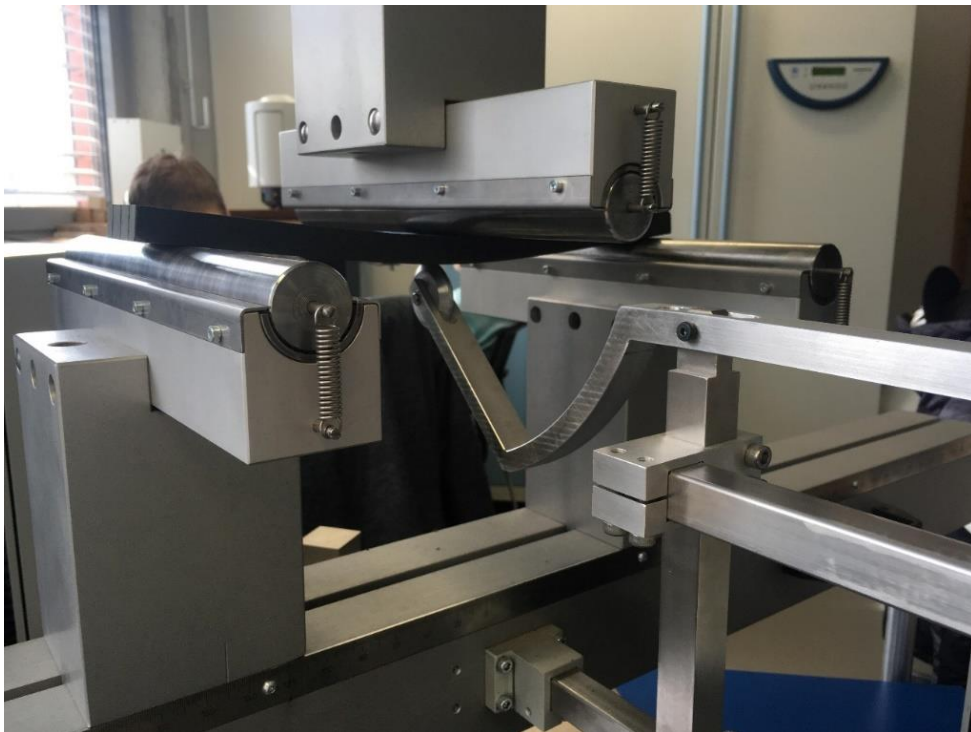
Modul pružnosti v ohybu je udáván kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Modul je odvozován z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem (Požgaj a kol. 1997). Chování materiálu v ohybu je kombinací v tlaku a v tahu. V tlaku ve směru vláken má výrazně elastické chování ovšem nakonec se poruší lomem v tahu.

Pracovní diagram ohybu (Obr 27). porovnává vlákna ze dřeva a polymeru (matrice) a kompozitního materiálu.



Obr. 27 Pracovní diagram WPC materiálu (Kovalinka a kol. 2019)

Zkušební vzorky byly jednotlivě vkládány do trhacího stroje (Obr. 28) a postupně zatěžovány. Zatěžování prováděla válcová zatěžovací hlava umístěná mezi podpěrami uprostřed. Podpěry jsou dvě uložené rovnoběžně s nastavitelnou vzdáleností, podle vztahu $L = 20 * t$ (mm). Rychlost zatěžování tělesa byla nastavována podle porušení zkušebního tělesa. Těleso muselo být poškozeno v době od 60-ti do 90-ti sekund. Průhyb zatěžovací hlavy uprostřed zkušebního tělesa byl měřen s přesností 0,1 mm. Výsledná naměřená hodnota s odpovídajícím zatížením byla zaznamenána s přesností na 1% naměřené hodnoty. Ze silového-deformačního diagramu vyobrazeného v programu Microsoft Excel se stanovila maximální síla a maximální průhyb na mezi úměrnosti a modul pružnosti v ohybu pro každý vzorek.



Obr. 28 Trhací stroj Tira s třibodovým ohybem WPC-dub 3(Autor)

5. Výsledky ohybové charakteristiky a diskuse

Statistické zpracování výsledků bylo vyhotoveno softwarem STATISTICA 13 od společnosti TIBCO Software Inc. Na vyhodnocení byla použita jednofaktorová ANOVA (zkratka Analysis of variance = analýza rozptylu), která využívá Fisherův F-test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. ANOVA je založena na 95 % intervalu spolehlivosti, což znamená, že ze 100 % připouští maximálně 5 % statistickou chybu.

Statistické vyhodnocení na základně hladiny významnosti označením P ve Fisherův F .testu, značí hodnoty statistické významnosti. Podle hladiny významnosti lze ohodnotit testovaný faktor:

- $P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky významný,
- $P > 0,05$ vliv faktoru není statisticky významný,
- $P = 0,05$ vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- $P = 0$ faktor působí,
- $P < 0,001$ vliv faktoru je statisticky velmi významný,
- $0,001 < P < 0,01$ vliv faktoru je statisticky středně významný,
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný (Gaff a kol. 2009).

Když jsou hodnoty hladiny významnosti v tabulce nižší jako 0,05, tak je daná vlastnost nebo faktor statisticky významný a je označen červenou barvou. Když je hodnota vyšší než 0,05 není faktor statisticky významný a je černou barvou

5.1. Modul pružnosti

Tab. 5 a Tab. 6 znázorňují vliv materiálu WPC na modul pružnosti před a po umělém stárnutí.

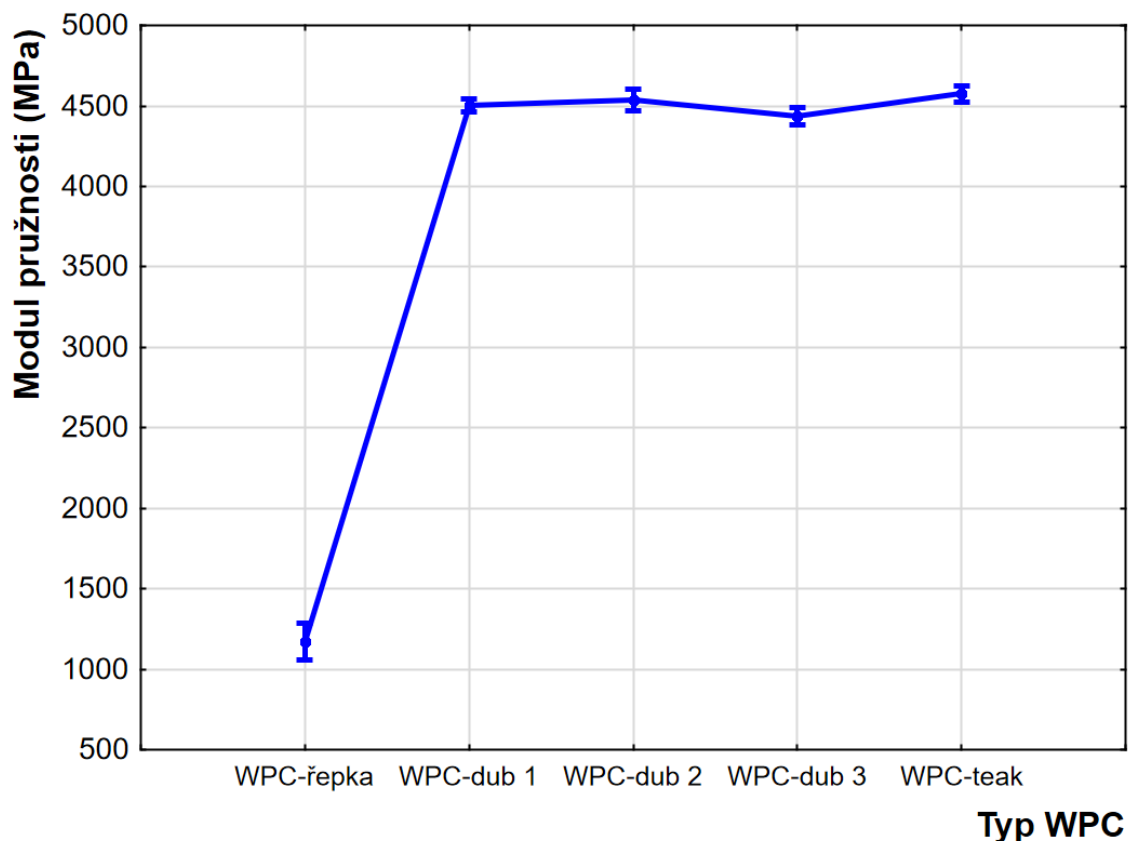
Tab. 5 Modul pružnosti před umělým stárnutím

Modul pružnosti – před umělým stárnutím					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	1012603919,0	1	1012603919,0	77059,4	0,000000
Typ WPC	110924778,7	4	27731194,7	2110,4	0,000000
Chyba	840995,8	64	13140,6		

Tab. 6 Modul pružnosti po umělém stárnutí

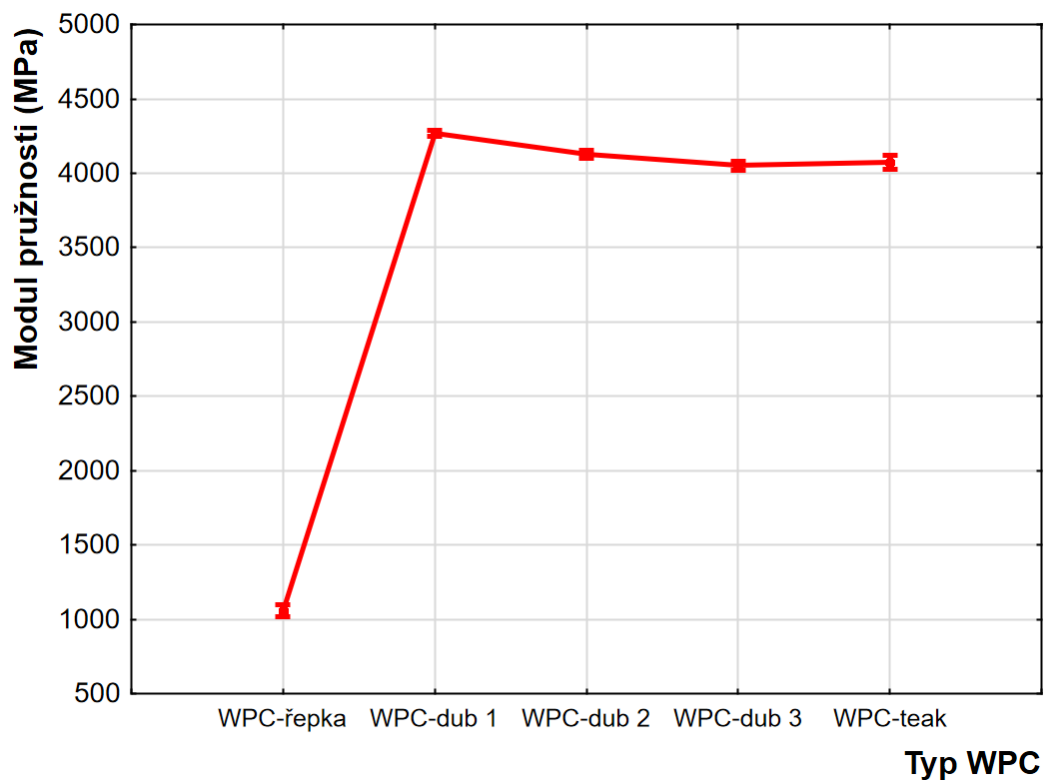
Modul pružnosti – po umělém stárnutí					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	887239118,3	1,0	887239118,3	234231,8	0,000000
Typ WPC	106578779,2	4,0	26644694,8	7034,2	0,000000
Chyba	253787,1	67,0	3787,9		

Graf 1 porovnává jednotlivé materiály mezi sebou. Hodnoty WPC materiálu z řepkových stonků mají třikrát menší hodnoty než u ostatních sledovaných materiálů, které byly s obsahem WPC dubu a teaku. Modul pružnosti u WPC-1 dub, WPC-2 dub, WPC-teak jsou téměř totožné a WPC-3 dub má pokles o cca 100 MPa. Všechny testované materiály mají velký modul pružnosti z důvodu obsahu polymeru, který má velkou plastifikaci.



Graf 1 Modul pružnosti před umělým stárnutím

Nejmenší změny po umělém stárnutí modulu pružnosti z Grafu 1 v porovnání s Grafem 2 jsou u materiálu s označením WPC-řepka a WPC-1 dub řádově 200 MPa. U ostatních materiálů jsme zaznamenaly po umělém stárnutí větší změny, došlo k výraznějšímu poklesu modulu pružnosti v řádově téměř až o 500 MPa.



Graf 2 Modul pružnosti po umělém stárnutí

Průměrné hodnoty moduly pružnosti jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Průměrné hodnoty modulu pružnosti

Soubor	Typ WPC	Modul pružnosti					
		průměr (MPa)	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)	- min. (MPa)	+ max. (MPa)	Počet těles
Před umělým stárnutím (reference)	WPC-řepka	1171,9	182,81	15,60	1055,4	1288,3	15
	WPC-dub 1	4504,6	76,51	1,70	4462,3	4547,0	15
	WPC-dub 2	4536,4	117,39	2,59	4471,4	4601,4	15
	WPC-dub 3	4437,7	91,48	2,06	4382,4	4492,9	15
	WPC-teak	4574,8	85,95	1,88	4525,2	4624,4	15
Po umělém stárnutí	WPC-řepka	1057,4	71,95	6,80	1015,9	1098,9	15
	WPC-dub 1	4268,4	30,11	0,71	4250,2	4286,6	15
	WPC-dub 2	4127,0	49,52	1,20	4099,5	4154,4	15
	WPC-dub 3	4052,9	53,48	1,32	4023,3	4082,5	15
	WPC-teak	4074,8	85,04	2,10	4027,7	4121,9	15

5.2. Mez úměrnosti

Mez úměrnosti je napětí, kdy v tělese vznikají pouze deformace pružné, případně pružné v čase za pomoci vnější působící síly. Po ukončení silového působení, deformace zanikají a zkušební těleso se navrátí do původního stavu (Urban 2019).

Tab. 8 a Tab. 9 znázorňují vliv materiálu WPC na mez úměrnosti před a po umělém stárnutí.

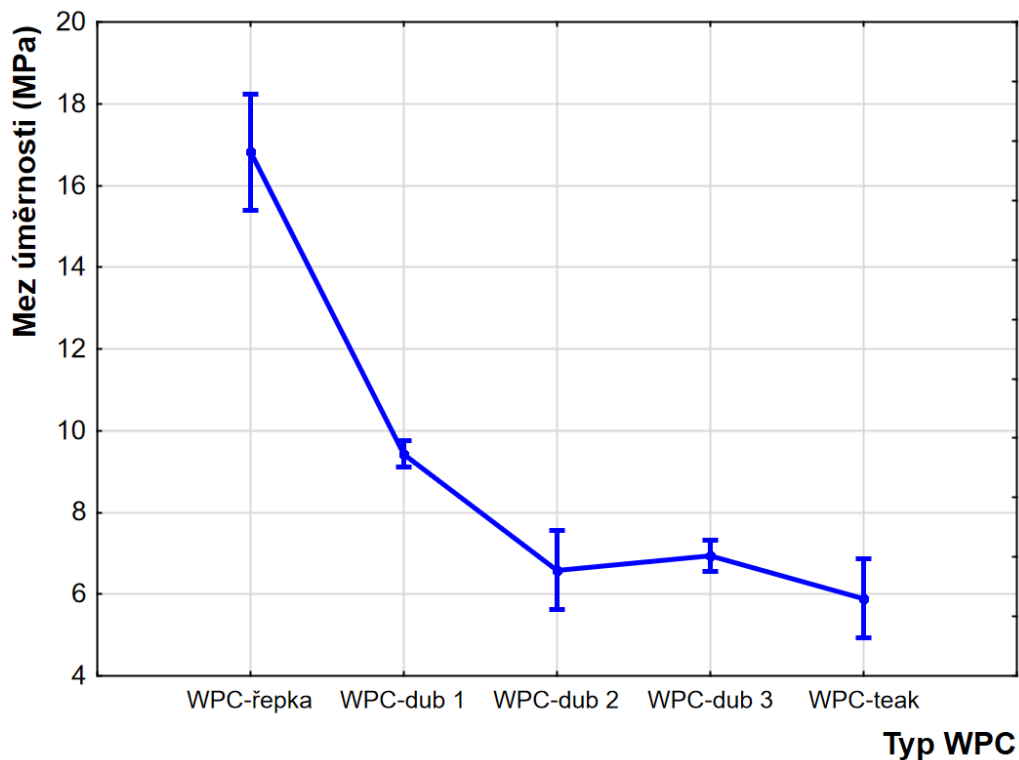
Tab. 8 Mez úměrnosti před umělým stárnutím

Mez úměrnosti – před umělým stárnutím					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	5716,587	1	5716,587	589,3573	0,000000
Typ zatěžování	1013,949	4	253,487	26,1335	0,000000
Chyba	620,781	64	9,700		

Tab. 9 Mez úměrnosti po umělém stárnutí

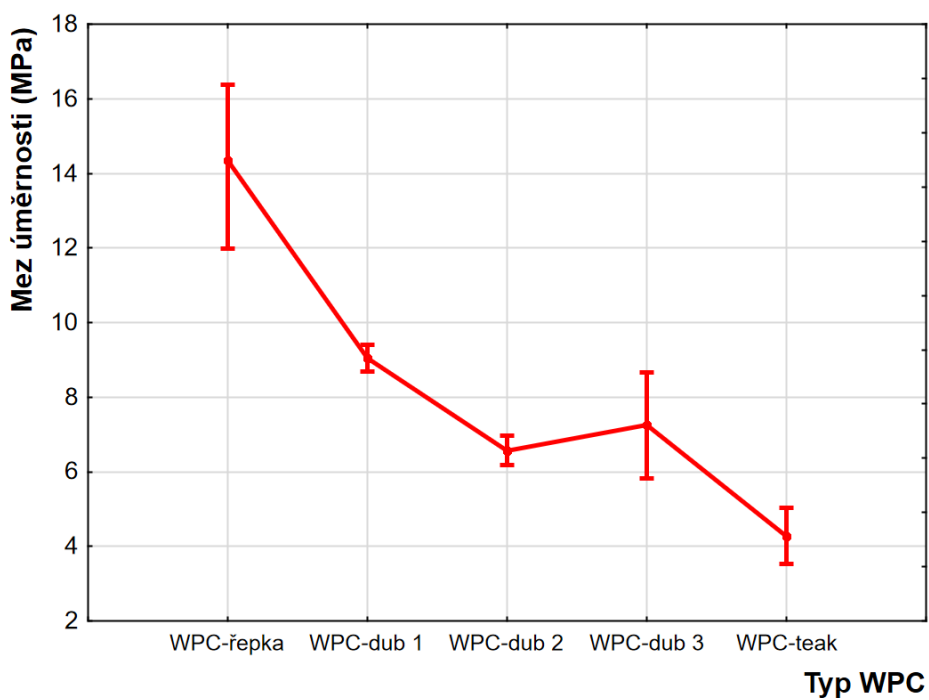
Mez úměrnosti – po umělém stárnutí					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	3501,998	1	3501,998	284,4375	0,000000
Typ zatěžování	173,510	4	43,378	3,5232	0,011318
Chyba	837,217	68	12,312		

Na Grafu 3 je vyobrazena mez úměrnosti, kde se opět projevilo přidání polymeru do zkoumaného materiálu, který zvýšil mez úměrnosti oproti rostlému dřevu (hodnota mezi úměrnosti dubu v tlaku napříč vláken 3 MPa). Nejlepších výsledků mezi úměrnosti dosahoval materiál WPC-řepka v rozmezí 15 až 18 MPa, což je velice uspokojivé a daleko přesahující ostatní zkoušené materiály. Porovnáme-li naměřené hodnoty ostatních materiálů s WPC-řepkou jedná se o velký rozptyl.



Graf 3 Mez úměrnosti před umělým stárnutím

Po procesu umělého stárnutí nám poklesly hodnoty mezí úměrnosti v porovnání s Grafem 3 s Grafem 4 u WPC-řepky a WPC-teaku v řádech 2 MPa. Hodnoty WPC s dubem zůstaly stejné.



Graf 4 Mez úměrnosti po umělém stárnutí

Průměrné hodnoty meze úměrnosti jsou uvedeny v Tab. 10.

Tab. 10 Průměrné hodnoty meze uměrnosti

		Mez úměrnosti					
Soubor	Typ WPC	průměr (MPa)	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)	- min. (MPa)	+ max. (MPa)	Počet těles
Před umělým stárnutím (reference)	WPC-řepka	16,8	8,49	50,53	15,4	18,2	15
	WPC-dub 1	9,4	0,56	5,97	9,1	9,7	15
	WPC-dub 2	6,6	1,75	26,54	5,6	7,6	15
	WPC-dub 3	6,9	0,62	8,93	6,6	7,3	15
	WPC-teak	5,9	1,69	28,60	4,9	6,9	15
Po umělém stárnutí	WPC-řepka	14,4	3,23	22,3	11,99	16,39	15
	WPC-dub 1	9,1	0,59	6,50	8,70	9,41	15
	WPC-dub 2	6,6	0,71	10,76	6,17	6,96	15
	WPC-dub 3	7,2	2,56	35,36	5,83	8,66	15
	WPC-teak	4,3	1,36	31,87	3,52	5,03	15

5.3. Minimální poloměr ohybu

Ohýbatelnost, je vyjádřena za pomoci minimálním poloměrem ohybu, při kterém nedojde k porušení materiálu (Urban 2019).

Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ byl vypočítán z rovnice podle Gaffa a kol. (2016).

$$R_{\min} = \frac{l_0^2}{8 * y_{\max}} + \frac{y_{\max}}{2} - \frac{h}{2}$$

y_{\max} = maximální odchylka

l_0 = vzdálenost podpěr

h = výška experimentálního tělesa

Tab. 11 a Tab. 12 znázorňují vliv materiálu WPC na minimální poloměr ohybu před a po umělém stárnutí.

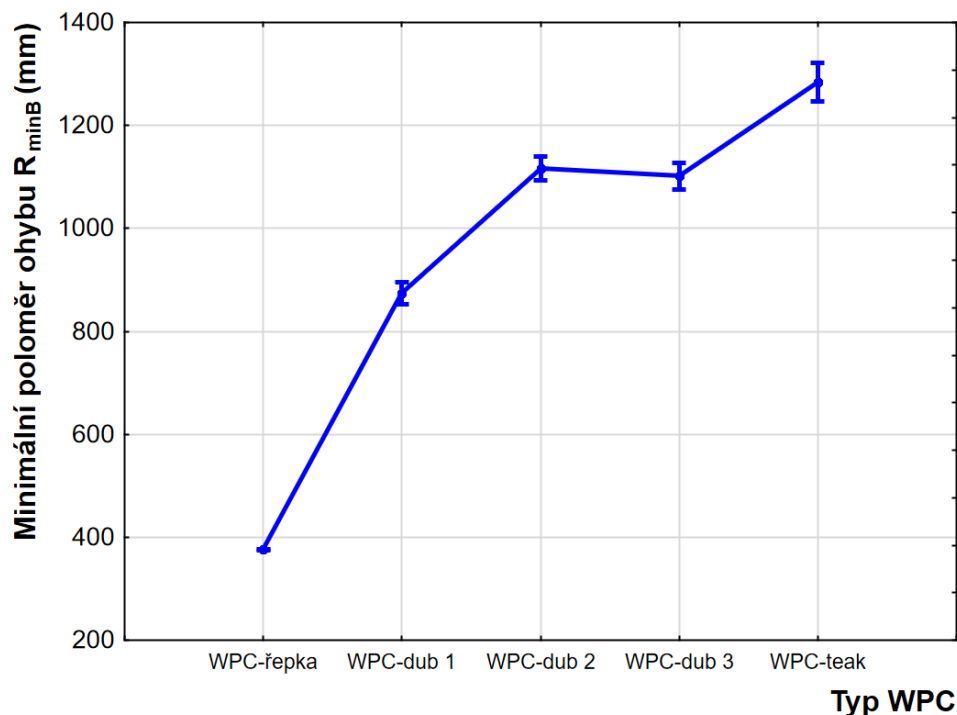
Tab. 11 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ před umělým stárnutím

Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ – před umělým stárnutím					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	61864238,1	1	61864238,1	32527,0	0,000000
Typ WPC	6295755,5	4	1573938,9	827,5	0,000000
Chyba	121723,8	64	1901,9		

Tab. 12 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ po umělém stárnutí

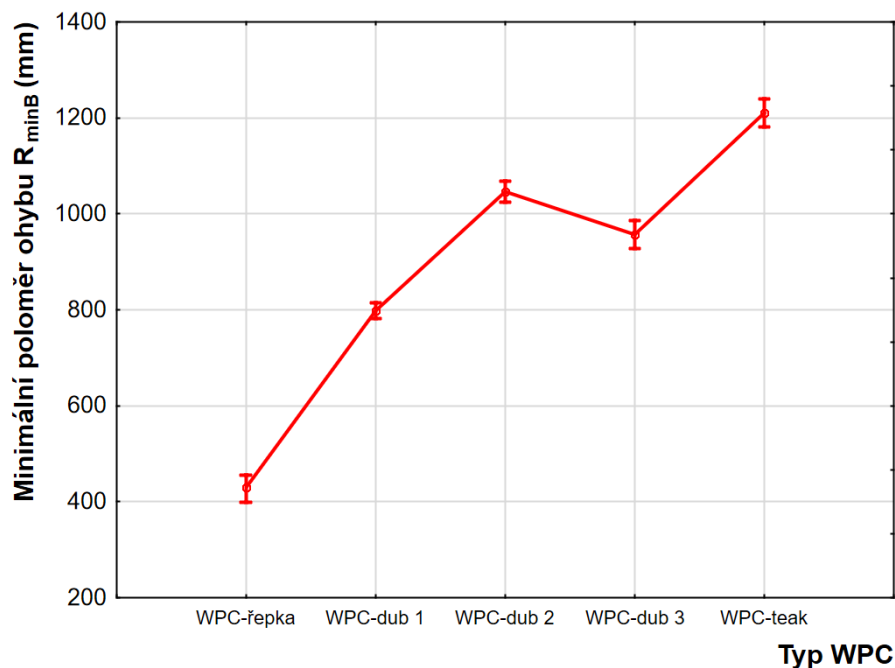
Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ – po umělém stárnutí					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	866895374,5	1	866895374,5	5,362460	0,023598
Typ WPC	1785661029,4	4	446415257,4	2,761445	0,034449
Chyba	10992880202,2	68	161660003,0		

Na Grafu 5 je vyobrazený nejmenší minimální poloměr ohybu WPC-řepky. Nejvyšších hodnot dosáhl WPC-teak. Hodnoty vzorku WPC-dub 2 a WPC – dub 3 jsou téměř shodné. WPC – dub 1 dosahoval cca o 200 mm méně než ostatní WPC – 2 a WPC - 3. Nejnižší hodnoty dosahoval WPC – řepka.



Graf 5 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ před umělým stárnutím

Graf 6 nám vyobrazuje, že WPC-řepka se nám po umělém stárnutí zvýšila oproti Grafu 5, ale ne významně. Největší pokles jsme zaznamenali u WPC-dub 3.



Graf 6 Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$ po umělém stárnutí

Průměrné hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min B}$ jsou uvedené v Tab. 13.

Tab. 13 Průměrné hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min B}$

Soubor	Typ WPC	Minimální poloměr ohybu $R_{\min B}$					
		průměr (mm)	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)	- min. (mm)	+ max. (mm)	Počet těles
Před umělým stárnutím (reference)	WPC-řepka	376,1	79,73	21,20	365,2	387,1	15
	WPC-dub 1	873,8	38,41	4,39	852,5	895,1	15
	WPC-dub 2	1116,1	41,60	3,73	1093,1	1139,1	15
	WPC-dub 3	1102,2	42,77	3,88	1076,4	1128,0	15
	WPC-teak	1283,8	64,97	5,06	1246,3	1321,3	15
Po umělém stárnutí	WPC-řepka	429,6	82,48	19,20	399,1	455,6	15
	WPC-dub 1	798,5	25,96	3,25	782,8	814,2	15
	WPC-dub 2	1046,5	40,82	3,90	1023,9	1069,1	15
	WPC-dub 3	956,8	53,07	5,54	927,4	986,2	15
	WPC-teak	1210,4	51,56	4,26	1181,8	1238,9	15

Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ byl vypočítán z rovnice podle Gaffa a kol. (2016).

$$R_{\min C} = \frac{l_0^2}{12 * y_{\max}}$$

l_0 = vzdálenost podpěr

h = výška experimentálního tělesa

Tab. 14 a Tab. 15 znázorňují vliv materiálu WPC na minimální poloměr ohybu před a po umělém stárnutí.

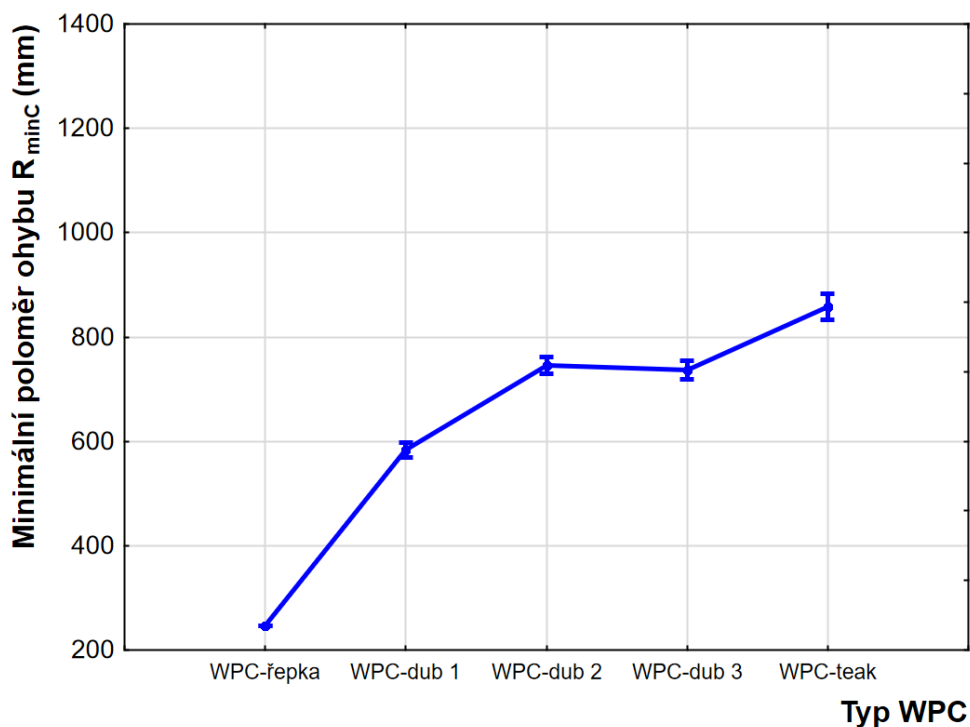
Tab. 14 Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ před umělým stárnutím

Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ – před umělým stárnutím					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	27526227,2	1	27526227,2	32284,3	0,000000
Typ WPC	2863001,4	4	715750,3	839,5	0,000000
Chyba	54567,7	64	852,6		

Tab. 15 Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ po umělém stárnutí

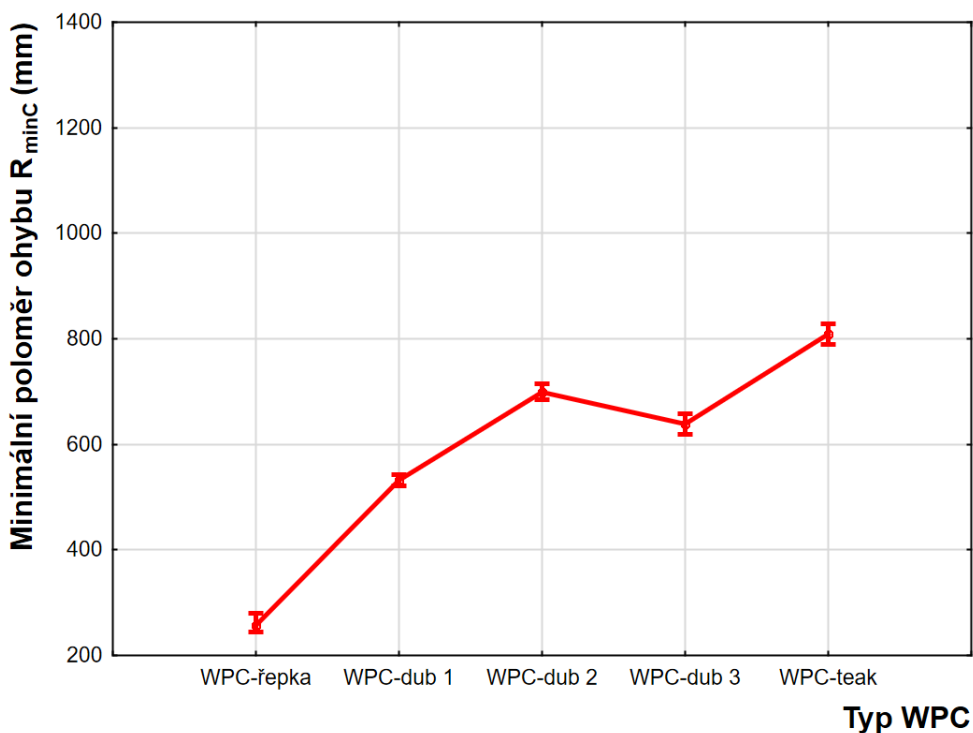
Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$ – po umělém stárnutí					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	385452559,5	1	385452559,5	5,362605	0,023596
Typ WPC	792889041,3	4	198222260,3	2,757766	0,034635
Chyba	4887693877,0	68	71877851,1		

Graf 7 Nejvyšších hodnot minimálního poloměru ohybu $R_{\min C}$ dosahoval materiál WPC-teak, kde rozdíl s WPC-řepkou, byl až o cca 600mm.



Graf 7 Minimální poloměr ohybu R_{minC} před umělým stárnutím

Proces umělého stárnutí minimálního poloměru ohybu R_{minC} vyobrazené na Grafu 8 nejméně ovlivnil materiál WPC-řepka, kdy jsou hodnoty téměř totožné s původním stavem vzorků na Grafu 7. Tento fakt můžeme hodnotit kladně, oproti jiným materiálům.



Graf 8 Minimální poloměr ohybu R_{minC} po umělém stárnutí

Průměrné hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min C}$ jsou uvedené v Tab. 16.

Tab. 16 Průměrné hodnoty minimálního poloměru ohybu $R_{\min C}$

		Minimální poloměr ohybu $R_{\min C}$					
Soubor	Typ WPC	průměr (mm)	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)	- min. (mm)	+ max. (mm)	Počet těles
Před umělým stárnutím (reference)	WPC-řepka	246,1	69,52	28,25	235,5	256,7	15
	WPC-dub 1	583,3	25,79	4,42	568,9	597,4	15
	WPC-dub 2	745,8	27,86	3,73	730,4	761,2	15
	WPC-dub 3	736,7	28,64	3,89	719,4	753,9	15
	WPC-teak	857,9	43,45	5,06	832,8	883,0	15
Po umělém stárnutí	WPC-řepka	257,0	59,75	23,25	234,3	280,3	15
	WPC-dub 1	532,6	17,46	3,27	522,1	543,2	15
	WPC-dub 2	699,2	27,36	3,91	684,1	714,3	15
	WPC-dub 3	639,1	35,59	5,57	619,4	658,9	15
	WPC-teak	808,8	34,51	4,27	789,7	827,9	15

5.4. Koeficient ohýbatelnosti

Míra ohýbatelnosti je vyjádřena koeficientem ohýbatelnosti, kde je poměr tloušťky h ohýbaného materiálu a minimálnímu poloměru ohybu r (Urban 2019).

Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} byl vypočítán z rovnice podle Gaffa a kol. (2016).

$$k_{ohB} = \frac{h}{R_{\min B}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{8 * y_{\max}} + \frac{y_{\max}}{2} - \frac{h}{2}}$$

y_{\max} = maximální odchylka

l_0 = vzdálenost podpěr

h = výška experimentálního tělesa

Tab. 17 a Tab. 18 znázorňují vliv materiálu WPC na koeficient ohýbatelnosti před a po umělém stárnutí.

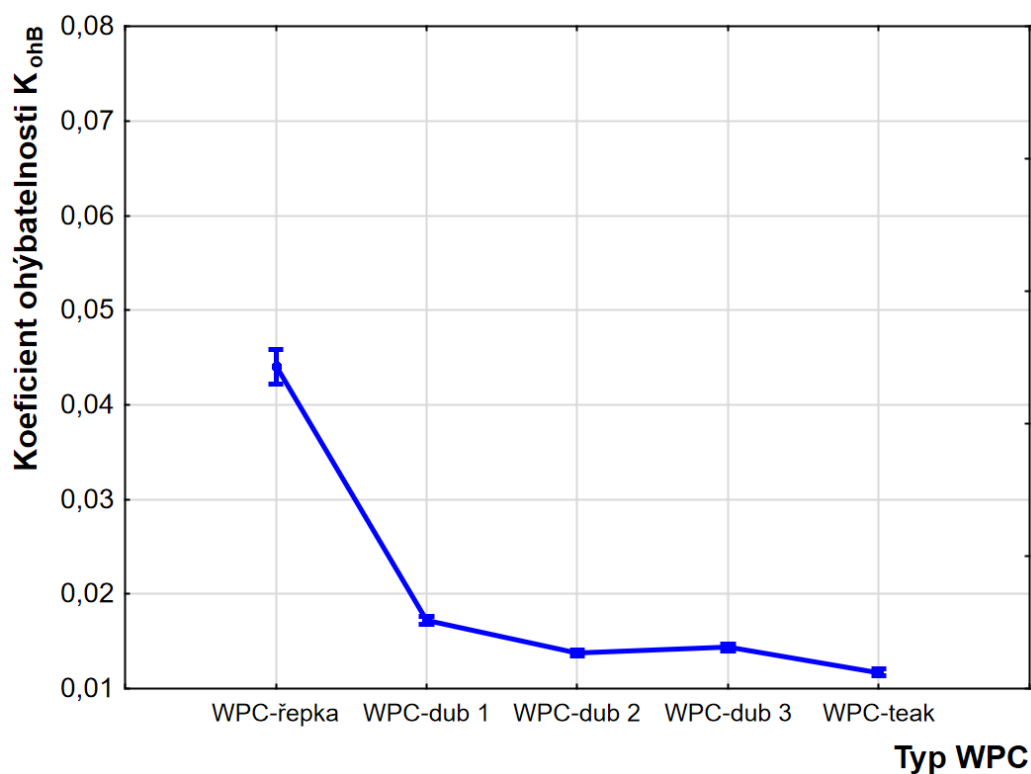
Tab.17 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} před umělým stárnutím

Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} – před umělým stárnutím					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	0,028000	1	0,028000	16407,81	0,000000
Typ WPC	0,008978	4	0,002245	1315,25	0,000000
Chyba	0,000109	64	0,000002		

Tab.18 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} po umělém stárnutí

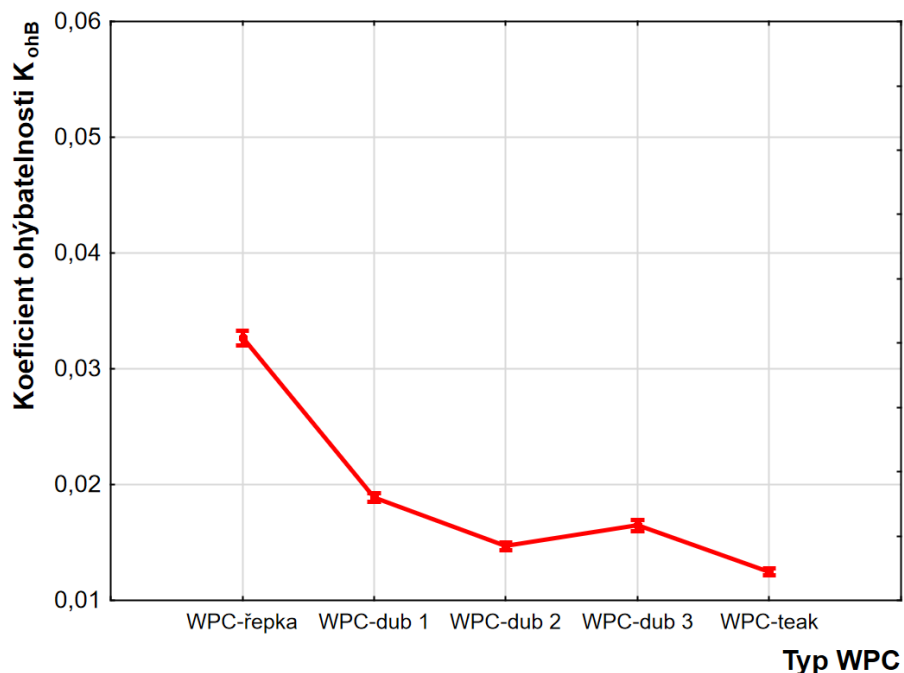
Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} – po umělém stárnutí					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	0,026349	1	0,026349	446,0433	0,000000
Typ WPC	0,003821	4	0,000955	16,1692	0,000000
Chyba	0,004017	68	0,000059		

Graf 9 nám odráží výsledky z grafů předešlých. Největší hodnoty koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} dosahovala WPC-řepka a nejnižší WPC-teak, ostatní hodnoty jsou srovnatelné.



Graf 9 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} před umělým stárnutím

Porovnáním Grafu 9 s Grafem 10 zachycuje pokles WPC-řepky, hodnoty ostatních materiálu zůstaly stejné.



Graf 10 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB} po umělém stárnutí

Průměrné hodnoty koeficientu ohýbatelnosti k_{ohB} jsou uvedeny v Tab. 19.

Tab. 19 Průměrné hodnoty koeficientu ohýbatelnosti k_{ohB}

Soubor	Typ WPC	Koeficient ohýbatelnosti k_{ohB}					Počet těles
		průměr (-)	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)	- min. (-)	+ max. (-)	
Před umělým stárnutím (reference)	WPC-řepka	0,044	0,0134	30,60	0,042	0,046	15
	WPC-dub 1	0,017	0,0007	4,34	0,017	0,018	15
	WPC-dub 2	0,014	0,0005	3,89	0,013	0,014	15
	WPC-dub 3	0,014	0,0006	3,93	0,014	0,015	15
	WPC-teak	0,012	0,0006	5,05	0,011	0,02	15
Po umělém stárnutí	WPC-řepka	0,033	0,0170	51,70	0,033	0,032	15
	WPC-dub 1	0,019	0,0006	3,24	0,019	0,019	15
	WPC-dub 2	0,015	0,0006	4,40	0,014	0,015	15
	WPC-dub 3	0,016	0,0009	5,21	0,016	0,017	15
	WPC-teak	0,012	0,0005	4,31	0,012	0,013	15

Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} byl vypočítán z rovnice podle Gaffa a kol. (2016).

$$k_{ohC} = \frac{h}{R_{minC}} = \frac{h}{\frac{l_0^2}{12 * y_{max}}}$$

y_{max} = maximální odchylka

l_0 = vzdálenost podpěr

h = výška experimentálního tělesa

Tab. 20 a Tab. 21 znázorňují vliv materiálu WPC na koeficient ohýbatelnosti před a po umělém stárnutí.

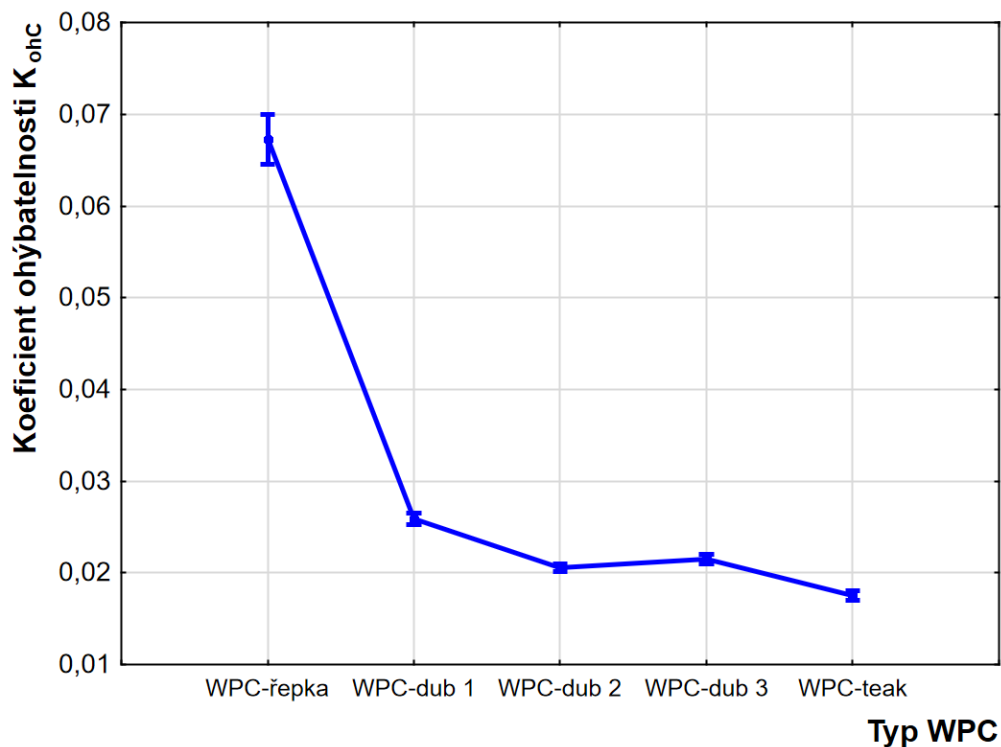
Tab. 20 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} před umělým stárnutím

Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} – před umělým stárnutím					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	0,063887	1	0,063887	16740,97	0,000000
Typ WPC	0,021353	4	0,005338	1398,81	0,000000
Chyba	0,000244	64	0,000004		

Tab. 21 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} po umělém stárnutí

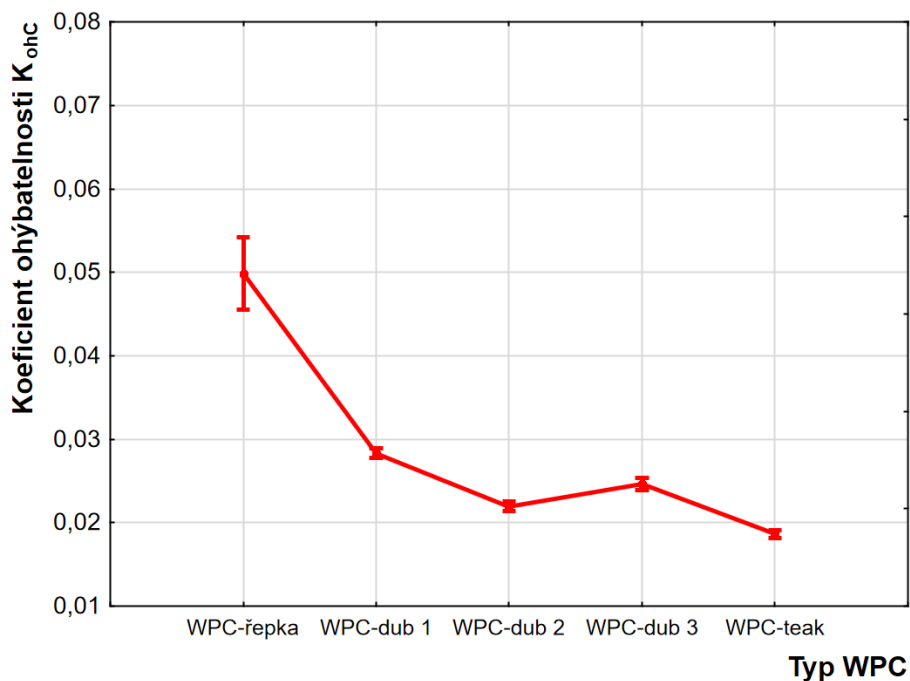
Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC} – po umělém stárnutí					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	0,059875	1	0,059875	434,3857	0,000000
Typ WPC	0,009165	4	0,002291	16,6221	0,000000
Chyba	0,009373	68	0,000138		

Graf 11 charakterizuje nejvyšší hodnotu WPC-řepky, ostatní materiály mají přibližně stejné hodnoty.



Graf 11 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohc} před umělým stárnutím

Výsledkem Grafu 12 s porovnáním původním Grafem 11 je, že koeficient ohýbatelnosti se nejvíce změnil, a to k nižším hodnotám u materiálu WPC-řepka u ostatních materiálů se koeficient ohybatelnosti téměř nezměnil.



Graf 12 Koeficient ohýbatelnosti k_{ohc} po umělém stárnutí

Průměrné hodnoty koeficientu ohýbatelnosti k_{ohC} jsou uvedeny v Tab. 22.

Tab. 22 Průměrné hodnoty koeficientu ohýbatelnosti k_{ohC}

		Koeficient ohýbatelnosti k_{ohC}					
Soubor	Typ WPC	průměr (-)	Směrodatná odchylka	Variační koeficient (%)	- min. (-)	+ max. (-)	Počet těles
Před umělým stárnutím (reference)	WPC-řepka	0,067	0,0205	30,53	0,065	0,070	15
	WPC-dub 1	0,026	0,0011	4,36	0,025	0,026	15
	WPC-dub 2	0,021	0,0008	3,90	0,020	0,021	15
	WPC-dub 3	0,021	0,0008	3,94	0,021	0,022	15
	WPC-teak	0,018	0,0009	5,06	0,017	0,018	15
Po umělém stárnutí	WPC-řepka	0,050	0,0260	51,73	0,046	0,054	15
	WPC-dub 1	0,028	0,0010	3,27	0,028	0,029	15
	WPC-dub 2	0,022	0,0010	4,40	0,021	0,023	15
	WPC-dub 3	0,025	0,0010	5,23	0,024	0,025	15
	WPC-teak	0,019	0,0010	4,32	0,018	0,019	15

WPC-řepka byla v porovnání s jinými experimentálními WPC materiály vždy extrémní, buď měla nejnižší nebo naopak nejvyšší hodnoty. Je to zejména díky složení materiálu. WPC-řepka obsahovala největší podíl polymeru, který způsobil větší plasticitu materiálu. Z tohoto důvodu byl modul pružnosti v ohybu nejnižší. Všechny zkoumané WPC materiály měly nízkou houževnatost (bez trhlin). Materiál WPC řepka vykazoval nejnižší přetvoření materiálu a oproti ostatním zkoumaným materiálům nedošlo k lomu. Umělé stárnutí bylo provedeno v deseti cyklech při simulování extrémních podmínek (prudké výkyvy teploty prostředí), kdy jsme zatěžovali zkoumané materiály v mrazu a následně v sušící komoře, umělé stárnutí všech zkoumaných materiálů mělo velmi uspokojivé výsledky. Došlo jen k mírnému poklesu naměřených hodnot v porovnání s hodnotami WPC materiálů naměřené před procesem umělého stárnutí.

Neměli bychom opomenout frakci dřevní hmoty a alternativního plniva, ovšem k těmto údajům jsme neměli přístup, protože se jedná o komerční produkt určený k prodeji a je vázán výrobním tajemstvím.

Naše výsledky byly porovnány s prací Khandkar a kol. (2018), která se zabývala zjišťováním vlivu velikosti částic a poměru směsi WPC materiálů. Výzkum se zabýval mechanickými vlastnostmi, konkrétně modulem pružnosti u WPC materiálu z dřevního pojiva a alternativního pojiva. Výsledky vycházely srovnatelné, jelikož obě práce se shodují v závěrečném vyhodnocení. Alternativní materiály jsou vhodnější pro kombinaci s polymery a následným vyhotovením WPC materiálů, z důvodu zlepšení modulu pružnosti.

6. Závěr

Cílem práce bylo stanovení vlivu umělého stárnutí WPC materiálů na mechanické vlastnosti WPC s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé, v porovnání s WPC s přídavkem dubu a teaku.

Porovnali jsme ohybovou charakteristiku modulu pružnosti materiálů mezi jednotlivými varianty. Hodnoty WPC materiálu z řepkových stonků mají třikrát menší hodnoty než u ostatních sledovaných materiálů, které byly s obsahem WPC dubu a teaku. Do WPC-řepky byl přidán větší podíl polymeru a z tohoto důvodu WPC-řepka se nepodařila zlomit. Modul pružnosti u WPC-1 dub, WPC-2 dub, WPC-teak jsou téměř totožné, avšak z hlediska lomu se nejlépe lámala varianta WPC-teak. WPC-3 dub má mírní pokles v modulu pružnosti v porovnání s ostatními variantami WPC-1 dubem, WPC-2 dubem a WPC-teakem.

Při porovnání hodnot ohybové charakteristiky před a po umělém stárnutí WPC materiálů, jsme dospěli k následujícím závěrům. Ohybové zkoušky dopadly velmi dobře, z velké příčiny je to kvůli menšímu množství plniva a velkému podílu polymeru a aditiv. Prokázali jsme, že u materiálu WPC po umělém stárnutí dochází jen k nepatrné změně v ohybových charakteristikách, a proto použití v exteriéru je vhodné. Nejmenší změny po umělém stárnutí modulu pružnosti jsou u materiálu WPC-řepky a WPC-1 dubu. U ostatních materiálů jsme zaznamenali po umělém stárnutí větší změny, došlo k výraznějšímu poklesu modulu pružnosti, celkově až o více jak dvakrát menšímu než u WPC-řepky a WPC-1 dubu.

WPC materiál patří do moderních kompozitních materiálů, které se v současnosti objevují na trhu. Pokud bychom porovnávali dřevo a WPC materiál, který je vzhledově podobný dřevu, srovnání by nám ukázalo na menší údržbu WPC materiálu a delší životnost z hlediska biotických škůdců a plísní. Velká výhoda WPC materiálu je přidání aditiv.

Z dosažených výsledků lze usuzovat, že použití řepky ozimé v podobě lignocelulózových vláken do WPC materiálu, je přínosné a získáváme tak dobrou alternativu plniva za dřevní hmotu. Velkým plusem shledáváme, že plnivo dokáže využít odpadní materiál v podobě stonků řepky ozimé.

Seznam použité literatury a internetových zdrojů

- Art bazény: WPC terasy [online]. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z:
<https://www.moderni-bazeny.cz/showroom/terasy-wpc>
- BLAHA, L. Analýza typů plniva na vlastnosti dřevoplastového kompozitu: Bakalářská práce. Brno: VÚT, Fakulta stavební, 2016.
- BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J. Materiály na bázi dřeva. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6.
- BŘEDCOVÁ, J. Nauka o materiálech: Makroskopická stavba dřeva [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <http://evawolna.sweb.cz/prvak-mat3.php>
- BUSCHOW, K. H. J., CAHN, R. W., VEYSSIÈRE. P., Encyclopedia of Materials – Science and Technology. Copyright, 2001. ISBN 978-0-08-043152-9.
- Depositphotos [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z:
<https://cz.depositphotos.com/36053085/stock-photo-rice-husk-on-white.html>
- DOLEJŠÍ, E. Vlastnosti dřeva - 3. vrchol trojúhelníku statiky [online]. akela.mendelu.cz [cit. 2019-04-06]. Dostupné z:
https://akela.mendelu.cz/~xcepl/inobio/inovace/Biomechanika_stromu/6_vlastnosti_dreva.pdf
- DUCHÁČEK, V. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 3. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2011. ISBN 978-807080-788-0.
- DUCHÁČEK, V. Technologické trendy ve zpracování plastových a pryžových odpadů. ODPADY PRAHA 99 (celostátní konference). Praha, 1999.
- Ekostavivo [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z:
<http://www.ekostavivo.cz/konopne-vlakno-pytel-8-kg-3106-02/>
- Expert [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.expert.cz/liebherr-lgt-3725/>
- FÍČEK, J. Nauka o dřevě [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z:
http://www.ped.muni.cz/wtech/03_studium/mtdr/Nauka_o_dreve.doc
- FILIPI, B. Plasty. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2003. ISBN 80-86634-13-2.
- Flour Wood: WPC terasy [online]. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z:
<https://www.floorwood.cz/terasy/wpc/>

- GAFF, M., GÁBORÍK, J., DUDAS, J., ŠŮRIKOVÁ, A. Vlastnosti povrchu dřeva modifikovaného reliéfováním. Zvolen: Technická univerzita ve Zvolenu, 2009. ISBN 978-80-228-2035-6.
- GAFF, M., VOKATÝ, V., BABIAK, M., BAL, B.C. Coefficient of wood bendability as a function of selected factors. Praha: Czech university of Life Science, 2016.
- HÝSEK, Š. Zhodnocení vlivu vazby lignocelulózový materiál/adhesivum na vlastnosti materiálů na bázi ligninu a celulózy a hodnocení parametrů ovlivňujících kvalitu lepeného spoje u těchto materiálů: Disertační práce. Praha: ČZU, FLD, Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí, 2018.
- JAKUBČÍK, V. Aplikace dřeplastových kompozitů v interiéru: Diplomová práce. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2017.
- JEŽ L. WPC kompozity na bázi PVC, diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně 2018
- KHANDKAR, S. R., NAZRUL, M. I., SOURAV, B.R., NABILA, H.D., SALEH, M. M., OBAIDULLAH, M.D. Properties of flat-pressed wood plastic composites as a function of particle size and mixing ratio, 2018. ISSN 1435-0211
- KLYOSOV, A. A. Wood-Plastic Composites. USA: Wiley, 2007. ISBN 978-0-470-14891-4.
- KOUBAA, A., PERRÉ, P., CLOUTIER, A. Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2009. ISBN 1359835X.
- KOVALINKA, P., SOVJÁK, R., ZATLOUKAL, J., MÁCA, P., LITOŠ, J., REITERMAN, P. Diagnostika poruch stavebního materiálu [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://ecentrum.fsv.cvut.cz/download/DPSM/6DPSM.pdf>
- KRÍŽ, E. Dřevoplast, jeho výroba a použití: určeno pracovníkům ve výrobě dřevoplastu a předmětů z něho lisovaných i spotřebitelům. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1960. Technická minima dřevařského průmyslu.
- KRŮPALA, K. Stavba dřeva, vlastnosti a vady dřeva [online]. Střední odborná škola Josefa Sousedíka Vsetín [cit. 2019-03-21].
- KUČEROVÁ, I., ŠIMŮNKOVÁ, E. Dřevo I. Slaný: Monografie STOP, 2000. ISBN 80-902668-4-3.

- LANGE, H. Improving the process efficiency of WPC extrusion by a production loss monitoring system. Faculty of Technology: Lahti University of Applied Sciences, 2013.
- NISKA, K. O., SAIN. M. Wood-Polymer Composites. Woodhead Publishing Materials, 2008. ISBN 9781845692728.
- NOVÁČEK, P. Kmen: Botanika [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Kmen_\(botanika\)#/media/File:Kmen.svg](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kmen_(botanika)#/media/File:Kmen.svg)
- NOVOTNÁ, B. Mezi stromy: Stavba dřeva [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://www.mezistromy.cz/vlastnosti-dreva-a-drevostaveb/stavba-dreva-cast-2-2/odborny#>
- OSSWALD, T. A., MENGES, G. Materials Science of Polymers for Engineers. 3. Hanser, 2012. ISBN 9781569905142.
- ROČEK, I. Dřeva tropických oblastí. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a environmentální, 2005. ISBN 80-213-1346-3.
- SEMERALUL, H. O., RIZVI. G. M. Characterization of properties of wood plastic composites (WPC) with glass fiber reinforcements. Oshawa: University of Ontario Institute of Technology, 2009.
- SOMBATSOMPOP, N., CHAOCHANCAIKUL, K., KHAMSRI, J., PRACHAYAWARAKORN, J. Effects of compatibilizer type and rubber-wood sawdust content on the mechanical, morphological, and thermal properties of PVC/LDPE blend [online]. 2006 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.24324>
- SOMBATSOMPOP, N., CHAOCHANCAIKUL, K., PHROMCHIRASUK CH., THONGSANG, S. Effect of wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites [online]. 2003 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pi.1386>
- Techagro: Mezinárodní veletrh zemědělské techniky [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.bvv.cz/techagro/techagro-2016/grand-prix-techagro-2016/prihlasene-exponaty/60-repka-ozima-orex/>
- Urban [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://www.eurourban.cz/vlastnosti-ohybaciho-dreva>

- VAVRČÍK, H. Anatomická stavba dřeva: Lexikon dřev [online]. Zpracováno jako projekt FRVŠ č. 65/2002. Ústav nauky o dřevě za finanční podpory Fondu rozvoje vysokých škol, 2002 [cit. 2019-03-21].
- VLAČKOVÁ, V. Stavební hmoty dřevo [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni_hmoty_II/Stavebni_hmoty_II_drevo.pdf
- WAGENFÜHR, R. Dřevo - obrázkový lexikon. Praha: Grada Publishing, 2007. ISBN 80-247-0346-7.
- WECHSLER, A., HIZIROGLU, S. Some of the properties of wood–plastic composites. USA: Building and Environment, 2007.
- WOLCOTT, M. P., SCHIRP, A. Influence of fungal decay and moisture absorption on mechanical properties of extruded wood-plastic composites: Wood Materials and Engineering Laboratory [online]. Washington State University: Department of Civil and Environmental Engineering, 2004 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/235979212_Influence_of_fungal_decay_and_moisture_absorption_on_mechanical_properties_of_extruded_wood-plastic_composites
- WoodflourMill: Dřevní moučka [online]. [cit. 2019-03-21]. Dostupné z: <https://woodflourmill4.webnode.cz/drevni-moucka/>
- WPC terasy: Profi terasy [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://www.profi-terasy.cz/wpc-terasy/>
- WPC-Poolterrasse: WPC online shop [online]. [cit. 2019-03-22]. Dostupné z: <https://www.wpc-poolterrasse.at/bambus-bpc-dielen-online-shop/bpc-bambus-terrassendielen/>
- ZLOMKOVÁ, L. Mechanické vlastnosti polymerů- statistické namáhání [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>