

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Dřevoplastové kompozitní materiály (WPC)
s přídatkem částic ze stonků řepky ozimé a jejich
mechanické vlastnosti**

Diplomová práce

Autor: BcA. Veronika Křenková

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Odborný konzultant: Ing. et Ing. Štěpán Hýsek, PhD.

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

BcA. Veronika Křenková

Dřevařské inženýrství

Název práce

Dřevoplastové kompozitní materiály (WPC) s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé a jejich mechanické vlastnosti

Název anglicky

Wood-plastic composites (WPC) filled by particles from rapeseed stems and their mechanical properties

Cíle práce

Cílem práce je stanovení vlivu přídavku částic ze stonků řepky ozimé do dřevoplastových kompozitních materiálů na mechanické vlastnosti tohoto materiálu.

Metodika

1. Vypracování literární rešerše na základě studia odborné literatury a porovnání výsledků jednotlivých autorů, kteří se věnují problematice výroby WPC z alternativních surovin a testování jejich vlastností.
2. Příprava a zajištění vzorků z různých typů WPC pro experimentální měření.
3. Experimentální měření mechanických vlastností dřevoplastových kompozitních materiálů.
4. Vyhodnocení zjištěných výsledků pomocí statistických metod.

Doporučený rozsah práce

60-80 stran

Klíčová slova

dřevoplast, řepka ozimá, WPC, mechanické vlastnosti, kompozitní materiál

Doporučené zdroje informací

- 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
- ROWELL, R. M. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. 2. vydání, CRC Press, 2012, 703 s. ISBN: 978-1-43985-380-1
- THAKUR, V. K. *Lignocellulosic Polymer Composites: Processing, Characterization, and Properties*. John Wiley & Sons, 2014, 584 s. ISBN: 978-1-118-77357-4
-

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 23. 2. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2019

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Dřevoplastové kompozitní materiály (WPC) s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé a jejich mechanické vlastnosti vypracovala samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a použila jsem jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědoma, že zveřejněním diplomové 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 18. 4. 2019

Veronika Křenková

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. za odborné konzultace a vedení práce, Ing. et Ing. Štěpánu Hýskovi, PhD. za přínosné odborné konzultace a pomoc s praktickou částí práce a v neposlední řadě své rodině a příteli za podporu při psaní této práce.

Abstrakt

Práce se zabývá hodnocením vybraných mechanických vlastností WPC materiálů s přídavkem částic ze stonků řepky ozimé a jejich porovnáním s klasickými WPC materiály. Hlavním cílem práce je stanovení vlivu částic stonků ze řepky ozimé na zkoumané mechanické vlastnosti, dále porovnání výsledků se čtyřmi klasickými WPC materiály a vyhodnocení výsledků statistickými metodami. Zkoumanými mechanickými vlastnostmi jsou pevnost v ohybu, tvrdost podle Brinella a přídržnost povrchu. Součástí práce je literární rešerše problematiky WPC kompozitů a jejich modifikací jinými lignocelulózovými materiály.

Klíčová slova: WPC, kompozitní materiál, řepka ozimá, mechanické vlastnosti

Abstract

The thesis focuses on evaluating selected mechanical properties of WPC materials filled by particles of rapeseed stems and their comparison with classic WPC materials. The main aim of the thesis is the assessment of influence of rapeseed-stem particles on the researched mechanical properties. Further aims are comparison of the results with four classic WPC materials and evaluation of the results by statistical methods. The researched mechanical properties are flexural strength, Brinell hardness and surface adhesion. The thesis includes also literature research aimed at the WPC composites and their modification with other lignocellulosic materials.

Key words: WPC, composite material, rapeseed, mechanical properties

Obsah

1. Úvod.....	12
2. Cíle práce.....	13
3. Materiály na bázi dřeva.....	14
3.1 Materiály z masivního dřeva.....	14
3.1.1 Řezivo.....	14
3.1.2 Spárovky.....	15
3.1.3 Biodesky.....	15
3.1.4 Modifikované dřevěné materiály.....	16
3.2 Překližované materiály.....	17
3.2.1 Překližky.....	17
3.2.2 Lat'ovky.....	17
3.3 Desky z dřevité vlny a cementu.....	18
3.4 Desky z plochých třísek.....	18
3.4.1 OSB.....	18
3.4.2 Multifunkční panely.....	19
3.4.3 Cementoštěpkové desky.....	19
3.5 Dřevotřískové desky.....	19
3.5.1 Cementotřískové desky.....	20
3.5.2 Modifikované třískové desky.....	20
3.6 Dřevovláknité desky.....	20
3.6.1 Cementovláknité desky.....	21
3.6.2 Sádrovláknité desky.....	21
3.7 Alternativní lignocelulózové materiály.....	21
3.7.1 Pazdeřové desky.....	21
3.7.2 Desky z lisované slámy (ekopanely).....	22
3.8 Dřevoplastové kompozity.....	22
4. Dřevoplastové kompozity (WPC).....	23
4.1 Historie dřevoplastových kompozitů.....	23
4.2 Složení dřevoplastových kompozitů.....	25
4.2.1 Dřevní složka.....	25
4.2.2 Používané termoplastické materiály.....	27

4.2.3 Aditiva.....	30
4.3 Výrobní technologie WPC.....	32
4.3.1 Příprava surovin.....	33
4.3.2 Kompaundace.....	33
4.3.3 Extruze.....	34
4.3.4 Vstříkování.....	34
4.4 Fyzikální vlastnosti dřevoplastů.....	35
4.4.1 Hustota.....	35
4.4.2 Vlhkost.....	35
4.4.3 Bobtnání a sesychání.....	36
4.4.4 Koeficient smykového tření.....	36
4.4.5 Teplotní deformace.....	37
4.5 Mechanické vlastnosti dřevoplastů.....	37
4.5.1 Zkoušky mechanických vlastností.....	38
4.5.2 Pevnost v ohybu.....	39
4.5.3 Pevnost v tahu.....	40
4.5.4 Pevnost v tlaku.....	41
4.6 Technologické vlastnosti dřevoplastů.....	41
4.6.1 Tvrdost.....	41
4.6.2 Odolnost proti otěru.....	42
4.7 Oblasti využití dřevoplastových materiálů.....	42
4.7.1 Podlahoviny.....	43
4.7.2 Fasádní obklady a ploty.....	44
4.7.3 Nábytek.....	44
4.7.4 Automobilový průmysl.....	45
5. Metodika.....	47
5.1 Zkouška pevnosti v ohybu.....	47
5.1.1 Zkušební zařízení.....	48
5.1.2 Zkušební tělesa.....	48
5.1.3 Postup zkoušky.....	49
5.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella.....	49
5.2.1 Zkušební zařízení.....	49
5.2.2 Zkušební vzorky.....	50

5.2.3 Postup zkoušky.....	50
5.3 Zkouška přídržnosti povrchu.....	51
5.3.1 Zkušební pomůcky.....	51
5.3.2 Zkušební vzorky.....	53
5.3.3 Postup zkoušky.....	53
6. Výsledky a diskuze.....	55
6.1 Pevnost v ohybu.....	55
6.2 Tvrdost podle Brinella.....	57
6.3 Přídržnost povrchu.....	59
7. Závěr.....	62
8. Seznam literatury.....	63
8.1 Tištěná literatura.....	63
8.2 Internetové zdroje.....	64

Seznam tabulek

Tab. 1. Srovnání vlastností HDPE a LDPE.....	28
Tab. 2. Vlastnosti polypropylenu.....	29
Tab. 3. Vlastnosti PVC.....	29
Tab. 4. Vlastnosti ABS.....	30
Tab. 5. Stranové bobtnání materiálu GeoDeck o různých hustotách. (Klyosov, 2007).....	36
Tab. 6. Srovnání ohybových charakteristik u PP, WPC a borovice (Rowell, 2005).....	40
Tab. 7. Vliv poměru složek kompozitu na ohybové charakteristiky (Klyosov, 2007).....	40
Tab. 8. Vliv hustoty na ohybové charakteristiky(GeoDeck) (Klyosov, 2007).....	40
Tab. 9. Srovnání tahových charakteristik u vybraných termoplastů (Klyosov, 2007).....	41
Tab. 10. Srovnání tahových charakteristik u PP, WPC a borovice (Rowell, 2005).....	41
Tab. 11: Srovnání tlakových charakteristik u vybraných termoplastů.....	41
Tab. 12. Zkoumané varianty materiálů.....	47
Tab. 13. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v ohybu (MOE).....	56
Tab. 14. Průměrné hodnoty meze úměrnosti v ohybu.....	56
Tab. 15. Průměrné hodnoty tvrdosti.....	57
Tab. 16. Průměrné hodnoty typu poškození a pevnosti v odtrhu.....	59

Seznam obrázků

Obr. 1. Terasa Forest Plus Palisander (Woodplastic, 2019).....	44
Obr. 2. Plot z plotových prken Massive (Perwood, 2019).....	44
Obr. 3. Městský mobiliář (Advance Plastic Recycling, 2017).....	45
Obr. 4. Polotovar opěrky hlavy (Jeluplast, 2019).....	46
Obr. 5. Tira Test 2850 S.....	48
Obr. 6. Struers DuraVision-30.....	50
Obr. 7. Coming 1P 20.....	52
Obr. 8. Zatěžování 1. varianty (větší průhyb).....	55
Obr. 9. Zatěžování 2. varianty (menší průhyb).....	55
Obr. 10. Graf závislosti tvrdosti podle Brinella na materiálu.....	57
Obr. 11. Srovnání vtisků 3. a 1. varianty.....	58
Obr. 12. Plocha lomu 5. varianty.....	59
Obr. 13. Graf závislosti typu poškození A na materiálu.....	60
Obr. 14. Graf závislosti typu poškození -/Y na materiálu.....	60
Obr. 15. Graf závislosti pevnosti v odtrhu na materiálu.....	60
Obr. 16. Srovnání plochy lomu jednotlivých variant na odtržených tělískách.....	61

1. Úvod

Dřevoplastové kompozity (WPC) se během posledních dvaceti let staly konkurenčně silnými alternativami klasických dřevěných materiálů, a to zejména na trhu exteriérových podlahovin a fasádních obkladů. Jejich potenciál ale stále roste, nejen ve zmíněných oblastech.

Potřeba neustále vyvíjet nové materiály je člověku přirozená. Kromě tendence zlepšování vlastností materiálů, tedy technologické pohnutky, za tím stojí také ekonomické trendy. Dřevo stále zdražuje a stává se nedostatkovou surovinou. Proto se hledají levnější alternativy tohoto materiálu.

Prvním stupněm byl vývoj aglomerovaných materiálů a jiných materiálů na bázi dřevních částic (jako WPC), jehož výhodou je zpracování dřevního odpadu z pilařské a truhlářské výroby a méně kvalitního dříví.

Dalším stupněm je úplné odstranění dřevní suroviny z takto vyvinutých materiálů. Pro získání nezávislosti na dřevní surovině jsou zkoumány jiné rostliny, které by mohly dřevo v těchto materiálech nahradit. Jednou z nich je řepka ozimá.

Řepka ozimá je zemědělská plodina pěstovaná v České republice ve velkém objemu. Po průmyslovém využití z ní zůstává také velký objem stonků, pro které se v posledních letech hledá smysluplné využití. Jedním z nich je výroba bioetanolu, nicméně kvůli podobnému chemickému složení řepky se dřevem se zkoumá její využití jakožto jeho alternativy.

Alternativním postupem náhrady dřeva je jeho úplná substituce jiným materiálem. Tento postup zaznamenal velký boom v 50.–70. letech minulého století s rozvojem plastů. Díky nízké ceně a široké dostupnosti se plastové výrobky brzy staly levnou náhradou různých přírodních materiálů. Tento trend se nyní pomalu obrací v souvislosti se špatnou rozložitelností plastů a jejich nepříznivým dopadem na prostředí. Omezení plastů může být dosaženo kromě jejich úplné náhrady jinými materiály také částečnou substitucí, tj. výrobou kompozitů.

2. Cíle práce

Cílem práce je stanovení vlivu přídavku částic ze stonků řepky ozimé do dřevoplastových kompozitních materiálů na mechanické vlastnosti tohoto materiálu. Součástí analýzy bude porovnání vybrané skupiny vzorků kompozitního materiálu na bázi plastu a stonků řepky ozimé se čtyřmi skupinami vzorků dřevoplastů.

Zkoumanými mechanickými charakteristikami budou pevnost v ohybu, tvrdost (podle Brinella) a přídržnost povrchu (neboli odtrhová pevnost). Tyto charakteristiky budou zkoumány experimentálním měřením podle odborných postupů. Zjištěné výsledky budou následně vyhodnoceny pomocí statistických metod.

Dílčím cílem práce je vypracování literární rešerše na základě studia odborné literatury a porovnání výsledků vlastností WPC kompozitů a WPC kompozitů s alternativními plnivý od jednotlivých autorů.

3. Materiály na bázi dřeva

Materiály na bázi dřeva lze klasifikovat několika způsoby; tím nejčastějším je způsob dělení podle použitého pojiva a konstrukce materiálu (Böhm a kol., 2012) v závislosti na velikosti použitých dřevěných částic. Pojiva dělíme na organická (nejvíce se používají lepidla na bázi formaldehydu) a minerální (sádra a cement).

Základní konstrukční částice dřevěných materiálů lze podle velikosti rozdělit na masivní dřevo (řezivo), dýhy, ploché třísky, štěpku, třísky, vlákna a dřevní moučku. Na základě těchto částic jsou dále popsány jednotlivé materiály. Materiály z masivního dřeva rozdělujeme na spárovky, bidesky, CLT panely a konstrukční dřevo používané na nosné konstrukce budov. Materiály vyrobené z dýh označujeme jako překližované materiály a řadíme mezi ně překližky, laťovky a dýhovky. Materiály vyrobené z částic o velikosti plochých třísek a menších nazýváme aglomerované materiály.

3.1 Materiály z masivního dřeva

3.1.1 Řezivo

Řezivo můžeme charakterizovat jako přírodní dřevo získané podélným dělením surového dříví či výřezů bez pojidel či dalších úprav. Jedinou technologickou úpravou bývá sušení, ať už přirozené (na vzduchu) či umělé (v sušárnách). Podle tvaru jej dále dělíme na řezivo deskové, hraněné a polohraněné.

Deskové řezivo je charakterizováno jako řezivo s šířkou dosahující alespoň dvojnásobku tloušťky. Rozlišujeme je ve formě prken (tloušťka do 40 mm) a fošen (tloušťka větší než 40 mm). Pro hraněné řezivo platí, že jeho šířka je menší než dvojnásobek jeho tloušťky a podle velikosti průřezu z něj vyčleňujeme čtyři skupiny: hranoly, hranolky, latě a lišty. Polohraněné řezivo je omítnuté pouze ze dvou stran – zůstávají mu tedy dva boky oblé; mezi polohraněné řezivo řadíme trámy (s tloušťkou větší než 100 mm) a povaly (s tloušťkou maximálně 100 mm).

Jelikož se jedná o rostlé dřevo, můžeme na materiálu podle vláken rozlišit tři směry: axiální (tedy rovnoběžný s vlákny), radiální a tangenciální. Ve všech těchto směrech má materiál rozdílné vlastnosti, což popisujeme jako anizotropní charakter dřeva. Z hlediska této práce je důležité, že mechanické vlastnosti v axiálním směru jsou mnohonásobně lepší než ostatních dvou směrech.

3.1.2 Spárovky

Spárovky jsou deskové materiály vytvořené slepením masivních dřevěných přířezů (nejčastěji hraněných). Jako pojivo je nejčastěji používáno vodou ředitelné PVAC lepidlo. Při výrobě se k sobě přířezy nejčastěji skládají střídavě levou a pravou stranou, aby se zamezilo prohýbání materiálu při sesychání (Böhm a kol., 2012).

Díky většímu rozměru základních dílů (tj. přířezů) si spárovky zachovávají vzhled rostlého dřeva, který je vnímán jako vysoce estetická vlastnost. Nevýhodou toho je stále poměrně velká anizotropie a bobtnání a sesychání materiálu při změně vlhkosti dřeva.

3.1.3 Biodesky

Biodesky můžeme charakterizovat jako třívrstvé desky z rostlého dřeva, jinak také jako třívrstvé křížem lepené spárovky. Jednotlivé přířezy jsou nejčastěji lepené PVAC lepidlem, zatímco pro plošné lepení se obvykle používá močovino-formaldehydové lepidlo (Böhm a kol., 2012).

Otočením střední vrstvy vůči krajovým o 90° je odstraněn anizotropní charakter materiálu a zároveň je dosaženo jeho větší tvarové stálosti při zachování vzhledu masivního dřeva. Díky tomu je materiál oblíbený v truhlářství na výrobu velkých kusů nábytku. Desky lepené melamin-fomaldehydovým lepidlem lze díky odolnosti tohoto lepidla proti vlhkosti využít i pro nosné konstrukce (Böhm a kol., 2012).

3.1.4 Modifikované dřevěné materiály

3.1.4.1 Termicky modifikované dřevo

Termicky modifikované dřevo vzniká působením vysokých teplot na dřevo za sníženého přístupu kyslíku (Sandberg a kol., 2017). V současné době se nejčastěji provádí tepelná modifikace působením teplot v rozsahu 160–280 °C. Teploty nižší než 140 °C nezpůsobují příliš výrazné změny, zatímco při teplotách nad 300 °C již dřevo degraduje, což se projevuje zhoršením jeho vlastností.

Samotný proces modifikace se provádí nejčastěji v autoklávu nebo jiné impregnační nádobě pomocí horké nasycené páry či oleje. Součástí technologického procesu je i sušení a klimatizování materiálu.

Termicky modifikované dřevo je charakteristické lepší rozměrovou stálostí a odolností vůči biodegradujícím činitelům. Oproti rostlému dřevu má tmavší zbarvení. Lze jej aplikovat na širokou škálu dřevin, proces je však nutné pro každou individuálně upravit (Sandberg a kol., 2017).

3.1.4.2 Chemicky modifikované dřevo

Chemická modifikace využívá chemických reakcí látek se složkami dřeva. Pomocí těchto chemických reakcí vznikají ve dřevě nové chemické vazby projevující se modifikovanými vlastnostmi. Je považována za aktivní modifikaci, protože dochází ke změnám v buněčných stěnách (Sandberg a kol., 2017). Nejvíce se pro chemickou modifikaci dřeva využívá acetanhydrid, neboli anhydrid kyseliny octové ((CH₃CO)₂O), a amoniak (NH₃), lze však do ní zahrnout i impregnaci.

Acetylací (tj. působením acetanhydridu) je dosaženo snížení hygroskopicity dřeva (voda ve dřevě se naváže na acetanhydrid), avšak částečně na úkor mechanických vlastností, které se působením acetanhydridu snižují. Na druhou stranu Sandberg a kol. (2017) zmiňují, že proces acetylace, který vyvinula společnost Accsys Technologies zlepšuje fyzikální i mechanické vlastnosti.

Působení amoniaku na rozdíl od acetanhydridu hygroskopicitu zvyšuje, zároveň ale zvyšuje i bod nasycení vláken. Používá se zejména pro plastifikaci dřeva.

Impregnace je založena na vtlačování chemické látky do dřeva. Látka vyplní dutiny a buněčné stěny dřeva. Následkem je ve většině případů snížení hygroskopicity a zvýšení odolnosti vůči biodegradujícím činitelům.

3.1.4.3 Mechanicky modifikované dřevo

Mechanická modifikace dřeva se provádí zhušťováním plastifikovaného dřeva pomocí mechanických sil. Často je k tomuto procesu využívána tlaková impregnace pryskyřicemi. Provádí se z důvodu zvýšení hustoty a pevnosti dřeva, nebo za účelem ohybu dřeva bez porušení jeho struktury. Kromě vyšší pevnosti takto modifikované dřevo vykazuje signifikantně vyšší tvrdost (Şenol a Bukdaçi, 2016).

Zhuštění dřeva může být dosaženo v ploše (zejména pro výrobu podlahovin), délce (pro následné tzv. studené ohýbání využitelné především ve výrobě nábytku) či v celém objemu.

3.2 Překližované materiály

3.2.1 Překližky

Překližky vznikají křížovým lepením souboru alespoň tří dých, což jsou tenké listy dřeva o tloušťce nejčastěji 1-3 mm, vyrobené krájením, loupáním či řezáním. Směry vláken sousedních vrstev (jednotlivých dých) jsou na sebe zpravidla kolmé.

Lepení překližek probíhá v lisu za použití organických pojidel, nejčastěji močovino-formaldehydovými (UF) nebo fenol-formaldehydovými (PF) lepidly. Volbou lepidla se dají ovlivnit některé vlastnosti výsledného materiálu, jako je pevnost nebo voděodolnost (při použití melamin-formaldehydového lepidla) (Böhm a kol., 2012).

Hlavní předností tohoto materiálu je částečné odstranění anizotropního charakteru dřeva a výrazné snížení bobtnání a sesychání, při zachování vzhledu rostlého dřeva v ploše.

Pro výrobu překližek je možno použít v zásadě jakoukoli dřevinu. V praxi se nejvíce používá smrkové dřevo pro konstrukční účely, zejména kvůli jeho výborným mechanickým vlastnostem. Pro výrobu nábytkových dílců je charakteristické použití listnáčů (např. břízy, buku) z důvodu jejich pohledových vlastností (Thompson. 2016).

3.2.2 Laťovky

Laťovky jsou na pohled podobné překližkám, liší se ale charakteristickým laťovkovým středem. Ten je oboustranně křížově olepený dýhou. Samotný laťovkový střed bývá lepený PVAC lepidlem nebo nelepený (Böhm a kol., 2012).

Podobně jako překližky mají laťovky snížený anizotropní charakter, je však nutné u nich zohledňovat směr středových latek při další výrobě. Použití laťovek je velmi podobné překližkám, používají se zejména ve výrobě nábytku.

3.3 Desky z dřevité vlny a cementu

Dřevní částice se v praxi pojí nejen organickými pojivy, ale i minerálními. V případě desek z dřevité vlny a cementu se jedná o cement a dřevo v podobě dlouhých tenkých pásků (vlny). Mineralizováním vlny, jejím smícháním s cementem a následným lisováním vznikají desky, které se vyznačují nízkou hustotou a dobrými tepelně a zvukově izolačními vlastnostmi. Díky těmto vlastnostem se desky z dřevité vlny a cementu používají na stavbu nenosných příček a izolací. Na nosné konstrukce materiál není vhodný, protože postrádá dostatečnou pevnost (Böhm a kol., 2012).

3.4 Desky z plochých třísek

3.4.1 OSB

OSB (z anglického „oriented strand board“ = „desky z orientovaných plochých třísek“) je aglomerovaný deskový materiál tvořený ze slisovaných vrstev plochých třísek o typické velikosti 0,4–0,8 x 6–25 x 75–130 mm. Vrstvy třísek jsou obvykle tři a střední vrstva je vůči krajním pootočena o 90° (krajní vrstvy určují hlavní podélný směr desky). Tento způsob výroby dodává OSB deskám podobné vlastnosti jako křížové lepení překližkám (Böhm a kol., 2012).

Výsledné vlastnosti OSB desek závisí na mnoha faktorech, jako je druh použité dřeviny, geometrie třísek, lisovací tlak, doba zavírání lisu, množství a typ lepidla a další. Oproti překližkám vykazují vyšší tloušťkové bobtnání. Díky nižším nárokům na vstupní surovinu bývají levnější (Böhm a kol., 2012).

OSB desky se používají pro konstrukční účely. Nejčastěji se s nimi setkáme na stavbách v podobě bednění, izolace a I-nosníků. V poslední době se objevuje také v industriálně laděných interiérech na nábytku či ve formě obkladů.

3.4.2 Multifunkční panely

Multifunkční desky, či multifunkční (CLT) panely jsou obdobou OSB desek. Vyrábí se jako jednovrstvé desky z neorientovaných třísek. Z toho důvodu vykazují stejné mechanické vlastnosti v obou směrech plochy, které ale nedosahují hodnot vlastností OSB v hlavním směru.

Neuspořádaná struktura třísek vyžaduje větší množství lepidla, které se projevuje zejména vyšší hustotou desek (Böhm a kol., 2012).

3.4.3 Cementoštěpkové desky

Ploché třísky lze kromě organických lepidel pojít také minerálními pojivy, konkrétně cementem. Před mícháním s cementem je nutné třísky mineralizovat, aby bylo dosaženo lepšího smáčení pojivem. Výsledný produkt bývá označován jako cementoštěpková deska. Jejich výhodou je odolnost proti vlhkosti a mrazuvzdornost, z toho důvodu se nejčastěji používají na stavbách (Böhm a kol., 2012).

3.5 Dřevotřískové desky

Dřevotřískové desky (DTD) jsou u nás v současné době nejvíce vyráběným aglomerovaným materiálem. To je dáno zejména snahou o výrobu materiálů z levných a dostupných surovin, v tomto případě odpadu z dřevovýroby. Tento dřevní odpad se zpracovává na třísky, suší na 3% vlhkost a třídí. Na roztríděné třísky je nanášeno lepidlo, poté se třísky vrství do tří vrstev (jemné třísky do povrchových vrstev a hrubé na středovou vrstvu) a následně lisují (Böhm a kol., 2012).

Mechanické vlastnosti DTD jsou obecně horší než u masivního dřeva, jejich výhodou je ale velmi malé bobtnání a sesychání, plošná izotropie a nízká cena (Böhm a kol., 2012).

DTD se vyrábí především z jehličnatých dřevin, jako smrk nebo borovice. (Rowell, 2005) Použití DTD je velmi široké, nejčastěji se však používají na nábytkové dílce, zejména ve formě laminovaných desek.

3.5.1 Cementotřískové desky

Spojením třísek pomocí cementu vznikne materiál označovaný jako cementotřísková deska. Vyrábí se zpravidla třívrstvé, z velmi jemných třísek pro povrchové vrstvy a hrubších třísek pro střední vrstvu. Výsledný materiál dosahuje hustoty okolo 1200 kg/m³, což je u materiálů na bázi dřeva poměrně vysoká hodnota. Výhodami těchto desek jsou homogenita, odolnost proti působení vlhkosti, mrazu a ohně a biodegradujícím činitelům (Böhm a kol., 2012).

3.5.2 Modifikované třískové desky

Kombinací třísek s dalšími materiály vznikají modifikované třískové desky. Těmito dalšími materiály může být například expandovaný vermikulit (komplex hořčíku, hliníku a železitého silikátu) nebo latex. Vermikulit modifikuje hořlavost výsledných desek, které se dále používají jako protipožární. Latex díky své elastické podstatě umožňuje ohýbání výsledného produktu.

3.6 Dřevovláknité desky

Dřevovláknité desky (DVD) se vyrábí z lisované rozvláknované štěpky. Desky mohou být vyrobeny s použitím lepidla i bez jeho použití. Podle stupně slisování rozlišujeme měkké, polotvrdé a tvrdé DVD. Hustota DVD je klíčová pro jejich další použití, neboť zásadně ovlivňuje jejich fyzikální a mechanické vlastnosti. Kvalitu DVD velmi ovlivňuje délka vláken, stejně jako typ použité dřeviny (Thompson, 2016).

Výroba DVD se provádí mokrým nebo suchým způsobem (dnes převažujícím). Mokrý způsob výroby je charakteristický postupným odvodňováním vláknité hmoty na sítěch a v lisech; u suchého způsobu jsou vlákna před lisováním sušena. Měkké DVD se vyrábí většinou mokrým způsobem za nízkého lisovacího tlaku a používají se převážně jako tepelná izolace. Polotvrdé DVD, jinak nazývané MDF (z anglického „medium density fiberboard“ = dřevovláknité desky se střední hustotou), se vyrábí suchým způsobem. Jejich specifickou vlastností je homogenita v celém průřezu desky, díky čemuž se používají na tvarované a reliéfované nábytkové dílce. Tvrdé DVD se vyrábí oběma způsoby, při mokrému způsobu je na finálním produktu patrný otisk odvodňovacího síta. Nejčastěji se vyrábí v tloušťkách 3 a 5 mm a používají se na záda skříňového nábytku (Böhm a kol., 2012).

3.6.1 Cementovláknité desky

Speciálním typem DVD jsou vláknité desky pojené cementem. Vlákna bývají typicky delignifikovaná a používají se i vlákna z recyklovaného papíru. Při výrobě se používá vysoký lisovací tlak, který spolu s jemnou strukturou vláken a vysokému podílu cementu zapříčiňuje velmi vysokou hustotu tohoto materiálu, která dosahuje hodnot až okolo 1700 kg/m^3 . Podobně jako cementotřískové desky se tento materiál vyznačuje velmi nízkou nasáklivostí, mrazuvzdorností a je nehořlavý. Setkáme se s ním především jako s obkladovým materiálem na stavbě (Böhm a kol., 2012).

3.6.2 Sádroláknité desky

Smícháním dřevních vláken se sádrou vznikne materiál označovaný jako sádroláknitá deska. Pro výrobu se podobně jako u cementovláknitých desek používají i vlákna z recyklovaného papíru. Oproti cementovláknitým deskám mají tyto desky nižší hustotu (okolo 1100 kg/m^3) a nižší odolnost proti vlhkosti. Vykazují zejména výbornou smáčivost stěrkovými omítkami. Využívají se nejčastěji na stavbu interiérových přiček (Böhm a kol., 2012).

3.7 Alternativní lignocelulózové materiály

Jedná se o materiály vyrobené z jiných lignocelulózových částí rostlin než je dřevo, přičemž použité částice jsou převážně třískového charakteru. Někdy se také nazývají NFC (z anglického „natural fibre composites“ = „kompozity z přírodních vláken“). Ve střední Evropě se pro jejich výrobu nejvíce využívá pazdeří (lněné, konopné), sláma, řepka, v tropických zemích pak bagasa (odpadní produkt z výroby cukru z cukrové třtiny), rýžová sláma či slupky, bambus, juta, rákos apod.

3.7.1 Pazdeřové desky

Pazdeřové desky (PAD) jsou desky vyrobené ze lněného nebo konopného pazdeří. Pazdeří je dřevitá část stonků rostlin, odpad, který vzniká při zpracování lýkových vláken lnu či konopí. V některých případech se pazdeří míchá s dřevními pilinami. Vzniklý materiál označujeme jako pilinopazdeřové desky (PPD) (NIS, 2013).

PAD se vyrábí jako jednovrstvé, plošně lisované desky za použití močovino-formaldehydových lepidel. Hustota těchto desek se pohybuje okolo 300–600 kg/m³. Vlastnosti PAD desek jsou srovnatelné s vlastnostmi klasických DTD desek. Používají se často na stejné aplikace, tj. převážně na nábytkové dílce.

3.7.2 Desky z lisované slámy (ekopanely)

Zpracováním odpadu obilného průmyslu – obilné slámy – vzniká nový materiál nazývaný ekopanel. Sláma je za vysokého tlaku a teploty lisována do desek o hustotě okolo 380 kg/m³. Povrch desek je polepován kartonem z recyklovaného papíru pro snazší manipulaci. Výsledný produkt má velmi dobré tepelné a zvukové izolační vlastnosti a především nízkou cenu. Používá se nejčastěji na stavbu pevných příček jako náhrada sádrokartonu či cihel (NIS, 2013).

3.8 Dřevoplastové kompozity

Dřevoplast, neboli WPC, je kompozitní materiál tvořený ze dvou hlavních složek, a to z polymerní matrice (30–60%) a plniva v podobě dřevní moučky (40–70%). Dřevní moučka může být nahrazena jinými organickými materiály na bázi celulósových vláken, například částicemi ze stonků řepky ozimé. Jako polymery se nejčastěji používají termoplasty polypropylen a polyethylen.

Kromě hlavních složek se do směsi pro výrobu WPC materiálů přidávají aditiva – látky pro zlepšení vlastností výsledného produktu. Patří mezi ně spojovací činidla, UV a jiné stabilizátory, retardéry hoření a pigmenty. Jejich působením je dosaženo vyššího synergického efektu výsledného kompozitního materiálu. Podrobněji bude tento materiál popsán v následující kapitole.

4. Dřevoplastové kompozity (WPC)

Za vznikem WPC stojí potřeba vyvíjet nové a levné materiály, jež je vyjádřena touhou člověka neustále se vyvíjet a zlepšovat a také snahou využít odpadní produkty dřevařské výroby a recyklovat výrobky a produkty již dále nesloužící svému účelu. Jde tak ruku v ruce se vzrůstajícím trendem dnešní doby „myslet na budoucnost“.

Spojením částic dřeva s plastem se sníží či eliminují zejména procesy degradace dřeva, jako je bobtnání, sesychání a biodegradace. Důsledkem toho je umožněna aplikace materiálu do exteriéru bez nutnosti použití ochranného nátěru.

4.1 Historie dřevoplastových kompozitů

Ačkoli veřejnosti není materiál pod zkratkou WPC (wood plastic composite) příliš znám, využití tohoto materiálu již v dnešní době není nepodstatné. Díky technologickému pokroku a snaze využít i ten nejmenší dřevní odpad vzniklo v minulém století mnoho nových materiálů na bázi dřeva. Kromě klasických dřevotřískových a dřevovláknitých desek mezi ně můžeme počítat i dřevoplastové kompozity. Mezi prvními společnostmi, které začaly dřevoplasty vyrábět, byli výrobci oken – okenní rámy se již dlouho vyrábí z plastu souběžně s dřevěnými rámy (Rowell, 2005).

První vyrobený dřevoplast můžeme vysledovat na začátek dvacátého století, poměrně krátce po objevení bakelitu belgickým chemikem Leem Henrym Baekelandem v roce 1907. Bakelit byl využíván jako první plastová matrice s výztuží dřevní moučky, a to v průběhu 20. let minulého století (Klyosov, 2007).

Větší rozvoj dřevoplastových materiálů nastal až v druhé polovině 20. století. Od 60. let byly (zejména v USA) jako matrice nejprve používány reaktoplasty, ty se však dnes již k výrobě WPC nepoužívají. Jako výztuž byla používána celulózová vlákna (Klyosov, 2007). Reaktoplasty (či termosety) jsou polymery, které při tváření teplem zesílují a není možné je tak opakovaně přetavit do jiného tvaru.

V 70. letech začaly první výzkumy výroby celulózo-vláknitých kompozitů na bázi termoplastů (polymery přetavitelné teplem). Kromě čistých celulózových vláken se začaly k výrobě používat základnější odpadní produkty jako dřevní moučka, rýžové slupky, starý papír, buničina atd. Tyto směsi ale neměly požadované vlastnosti; zjistilo se, že celulózová vlákna nelze v plastické hmotě rovnoměrně rozptýlit, což je zapříčiněno jejich rozdílnou

hydrofilitou – celulózová vlákna jsou hydrofilní, zatímco termoplasty jsou hydrofobní. Do směsi se tak začala přidávat minerální aditiva a později spojovací činidla, která měla tento problém odstranit (Klyosov, 2007).

Mechanické (i fyzikální) vlastnosti byly středem zájmu výzkumu 80. let. Důraz byl kladen zejména na zlepšení mechanické pevnosti, houževnatosti a odolnosti tepelné deformaci. Bylo zjištěno, že vyšší vlhkost celulózových vláken zvyšuje pórovitost výsledných WPC produktů a tak snižuje hustotu, ale zároveň urychluje oxidaci, čímž činí výsledný produkt méně trvanlivý. Snahou tak bylo snížit vlhkost vláken na minimum. S tím souvisí také zaměření pozornosti na zlepšení kompatibility mezi vlákny a matricí a s tím související vývoj spojovacích činidel. Tato činidla se mohou chemicky vázat na celulózová vlákna, nebo na polymer, nebo mezi nimi mohou vytvořit kovalentní chemickou vazbu. Upravují jejich vzájemnou adhezi (Klyosov, 2007).

Ačkoliv od přechodu od reaktoplastů k termoplastům se jako matrice nejvíce využíval vysokohustotní polyethylen (HDPE), první průmyslovou aplikací dřevoplastového kompozitu se stal v roce 1983 polypropylen ve směsi s dřevní moučkou. Americká společnost Lear Corporation ve Wisconsinu začala z tohoto materiálu vyrábět panely pro automobilové interiéry (Schut, 1999).

Výzkum v 90. letech se zaměřil na zkoumání vlastností dalších termoplastických materiálů, jmenovitě na nízkohustotní polyethylen (LDPE), polystyren (PS), polyvinyl acetát (PVC), ethyl-vinyl acetát (EVA) a akrylonitril butadienstyren (ABS).

Kromě výzkumu jiných termoplastů se výzkum dřevoplastových kompozitů v 90. letech zaměřil také na to, jak materiál vylehčit bez toho, aby ztratil své dobré vlastnosti. Celulózová vlákna (zejména v kombinaci s polyethylenem) bohužel neumožňují přílišné vylehčování, neboť tímto způsobem dochází ke snížení pevnosti v ohybu a modulu pevnosti v ohybu. Z tohoto důvodu se do směsi pro vylehčené WPC musí přidávat spojovací činidla, nebo se jako matrice musí zvolit silný plast, např. PVC (Klyosov, 2007).

4.2 Složení dřevoplastových kompozitů

4.2.1 Dřevní složka

Dřevo je v dřevoplastových kompozitech zastoupeno většinou ze 40–60%, i když procentuální rozptyl může být i větší. Termín „dřevo“ není zcela přesný, neboť kromě dřevní moučky a dřevních vláken se v těchto materiálech využívá i jiných rostlinných lignocelulóзовých materiálů, jako je len, rýžové slupky, juta, konopí, sisal, kokos a další. Trendem je recyklování dřevěných výrobků (Klyosov, 2007; Fortum Circo, 2019; Cision, 2018).

Dřevo se skládá z celulózy, hemicelulóz a ligninu. To jsou stavební polysacharidy, které jsou v jednotlivých rostlinách zastoupeny v různém poměru.

Čistá, deligninovaná, celulóza je v dnešní době využívána jen zřídka, a to přesto, že lignin má obecně na WPC produkty spíše negativní vliv z hlediska trvanlivosti (zejména v exteriéru – kvůli své UV nestabilitě) a hořlavosti.

Hemicelulózy mohou mít díky poměrně vysokému obsahu vázané vody fatální dopady na výrobní stroje při výrobě WPC. Při změnách tlaku se tato voda mění v páru a nastává efekt parní exploze, při které se hemicelulózy rozpadají a tvoří kyselinu octovou, jež naleptává kovové nástroje (Klyosov, 2007).

4.2.1.1 Dřevní moučka

Nejvíce se v dřevoplastovém průmyslu jako plnivo (výztuha) využívá dřevní moučka. Dřevní moučka je dřevo v podobě velmi malých částic, či krátkých vláken o velikosti 10–80 mesh. Mesh je jednotka velikosti zrn, v tomto případě odpovídající 2 mm–180 μm . Nejčastěji se pro její výrobu používá dřevo smrkové, javorové a dubové, dodávané lesními a zpracovatelskými pilami, truhláři, či výrobci oken a dveří ve formě výrobního odpadu (Rowell, 2005). Většina světových výrobců se zaměřuje na zpracování tvrdých dřevin, důvodů je více:

- 1) WPC výrobky často nahrazují výrobky z tvrdého dřeva,
- 2) tvrdé dřeviny se lépe impregnují a
- 3) měkké dřeviny kvůli své (většinou) nižší hustotě je třeba více chemicky ošetřit, aby dosáhly srovnatelných vlastností s tvrdými dřevinami (Li, 2011).

Největším producentem dřevní moučky v ČR je společnost WoodflourMill, a. s., která se zaměřuje především na výrobu dřevní moučky ze smrkových hoblin a pilin s 5% vlhkostí (Evropská databanka, 2019).

Hustota dřevní moučky se pohybuje okolo 1,3–1,5 g/cm³. Nezávisí na velikosti částic (Klyosov, 2007), nýbrž na vlhkosti. Objemová hustota dosahuje typicky 0,1–0,3 g/cm³.

4.2.1.2 Dřevní vlákna

Dřevo v podobě vláken se využívá kvůli lepším mechanickým vlastnostem oproti dřevní moučce. Dlouhá vlákna zapříčiňují vyšší ohybovou a tahovou pevnost i modul v tahu WPC ve srovnání s WPC plněnými dřevní moučkou. Nevýhodou je horší mísitelnost s plasty, větší bobtnání z důvodu vyšší absorpce vody a vyšší cena (Klyosov, 2007).

Chemické složení dřevních vláken závisí na druhu dřeviny, zejména na tom, zda patří do čeledi jehličnatých či listnatých. Jehličnaté dřeviny obsahují přibližně 42% celulózy, 27% hemicelulóz a 30% ligninu. U listnatých dřevin se setkáme s vyšším podílem celulózy a hemicelulóz a nižším podílem ligninu, přibližně se udává 45% celulózy, 34% hemicelulóz a 20% ligninu. Zbylé procento tvoří extraktiva (Klyosov, 2007).

4.2.1.3 Rýžové slupky

Rýžové slupky jsou odpadním produktem rýžových mlýnů. Činí asi 20% váhy sklizené rýže, proto se hledalo jejich další využití. Tím se stalo lisování do produktu napodobujícího dřevěné řezivo a výroba WPC. Pro výrobu WPC se využívají hlavně v USA.

Složení rýžových slupek je velmi podobné složení dřeva (asi 40% celulózy, 25% hemicelulóz a 15% ligninu). Obsahují však více minerálů (zejména křemičitanů), a to až 15–20%, díky čemuž jsou odolnější vůči biodegradacním činitelům, nejvíce houbám (Klyosov, 2007). Kromě toho odolávají vlhkosti lépe než dřevo. Z důvodu přítomnosti velkého množství křemíku jsou však abrazivnější a snáze tak ve výrobním stroji vytváří teplo, je tedy nezbytné přidávat k WPC směsi aditiva na snížení těchto efektů (Defonseka, 2014).

4.2.1.4 Papírenská kaše

Papírenský kal a kaše jsou odpadními produkty výroby papíru a buničiny. Představují environmentální problém zejména z hlediska použitých chemikálií. Sestávají ze stejných složek jako papír (celulóza, lignin, hemicelulózy, oxid vápenatý, jíl a další), ale z důvodu krátkých celulózových vláken nejsou vhodné k výrobě papíru. Pro výrobu WPC se používají spíše zřídka (Klyosov, 2007).

4.2.1.5 Řepka ozimá

Řepka ozimá, jinak zvaná brukev řepka olejka (*Brassica napus* L.), je jednoletá či dvouletá bylina z čeledi brukvovitých původně ze středomoří. Pěstuje se jako pícnina a olejnína pro potravinářský průmysl (Skládanka, 2006), ačkoliv v posledních letech vzrostl její význam v oblasti výroby biopaliv a i proto se její produkce za posledních pětadvacet let zvýšila. Stonky řepky se většinou po sklizni zaorávají do půdy či se z nich vyrábí pelety, nemají žádné větší průmyslové využití, ačkoli mají potenciál např. pro výrobu kompozitních materiálů. V minulosti byly vedeny výzkumy na využití řepkových stonků pro výrobu třískových desek s pozitivními výsledky, splňujícími normy (Hýsek, 2018).

Chemické složení stonků řepky je podobné složení dřeva listnatých dřevin: cca 40% celulózy, 24% hemicelulózy a 21% ligninu (Hýsek, 2018).

4.2.2 Používané termoplastické materiály

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, termoplasty jsou polymery, které lze opakovaně tvarovat teplem. Jsou to (částečně) amorfní látky (některé polymery vytváří za určitých podmínek krystalickou mřížku), které se při nižších teplotách nacházejí v pevném stavu skupenství. V případě amorfních látek hovoříme o skelném stavu. Se zvyšující se teplotou termoplast postupně měkne, dokud se úplně nerozpustí. Tuto fázi nazýváme fází skelného přechodu. Oproti tomu termosety při zahřívání neměkknou, pouze degradují, proto je nelze opakovaně tvářet (Åström, 1997).

V dřevoplastových kompozitech je možné použití pouze takových plastických materiálů, které lze zpracovat při teplotě nižší než 200 °C, a to kvůli tepelné stabilitě dřeva. Tyto podmínky lze upravit delignifikací dřevních vláken, či přidáním minerálů, které částečně teplotně izolují celulózová vlákna. Další možností je urychlit proces zpracování

a zkrátit tak kontaktní čas dřevních vláken s horkým plastem. Kromě nejpoužívanějšího polyethylenu, polypropylenu a polyvinylchloridu tak lze jako matrici WPC materiálů použít například Nylon 6 (teplota tavení 216 °C) (Klyosov, 2007).

4.2.2.1 Polyethylen

Polyethylen (PE) je nejpoužívanějším plastem vůbec, jak z hlediska světové produkce plastů (používá se na výrobu obalů, folií, trubek atd.), tak dřevoplastových kompozitů, kde je jeho využití na cca 83% výroby WPC (Rowell, 2005). Patří do skupiny polyolefinů, což jsou homopolymery či kopolymery olefinů nebo alkenů, tj. uhlovodíků obsahujících dvojnou vazbu. Polymerace ethylenu je dosaženo pomocí tzv. Zieglerových katalyzátorů.

PE má poměrně nízkou teplotu tání (106–130° C), je poměrně měkký a odolný vůči chemikáliím. Dělí se na několik typů, z nichž nejčastěji se setkáme s vysoce hustotním (HDPE) a nízkohustotním polyethylenem (LDPE). Srovnání vlastností těchto dvou typů je popsáno v tabulce 1. HDPE má v porovnání s LDPE, a s ostatními polymery vůbec, vyšší krystalinitu (schopnost uspořádání molekul do krystalové mřížky), pevnost a tvrdost a náchylnost k deformacím.

Tab. 1. Srovnání vlastností HDPE a LDPE.

vlastnosti	HDPE	LDPE
vzorec	$(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$	$(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$
hustota (kg/m ³)	940-970	915-935
mez pevnosti (MPa)	20-30	8-10
modul pružnosti (MPa)	1000	200

4.2.2.2 Polypropylen

Po polyethyleny je polypropylen (PP) druhým nejvíce využívaným termoplastem pro výrobu WPC materiálů. Opět se jedná o polyolefin, svou strukturou je podobný PE. Ve srovnání s PE je jeho spotřeba mnohem menší, přestože je levnější; používá se asi na 9% materiálů z celkové produkce WPC (Rowell, 2005). Je to dáno zejména jeho křehkostí při nízkých teplotách, neboť jinými vlastnostmi, jako je hustota, pevnost, tvrdost, chemická

odolnost a odolnost vůči krípu polyethylen převyšuje. Tvrdost se ovšem ukazuje také jako negativní vlastnost, zejména z hlediska připevňování a spojování výrobků z WPC na bázi PP šrouby či hřebíky.

Základní vlastnosti PP jsou popsány v tabulce 2 níže.

Tab. 2. Vlastnosti polypropylenu.

vlastnosti	PP
vzorec	$(\text{CHCH}_2\text{CH}_2)_n$
hustota (kg/m^3)	910
mez pevnosti (MPa)	21-30
modul pružnosti (MPa)	1450

4.2.2.3 Polyvinylchlorid

Třetím nejpoužívanějším termopolymerem (cca 7% produkce WPC) je polyvinylchlorid (PVC) (Rowell, 2005). Známe ho v tvrdé (Novodur) a měkčené (Novoplast) formě. Pro výrobu WPC se používá tvrdý PVC, kvůli jeho vysoké hustotě se ale WPC výrobky dělají vylehčované. Nelze jej však běžně recyklovat z důvodu uvolňování škodlivých látek při jeho zahřívání.

Vlastnosti PVC popisuje tabulka 3 níže.

Tab. 3. Vlastnosti PVC.

vlastnosti	PVC
vzorec	$(\text{CHCl-CH}_2)_n$
hustota (kg/m^3)	1320-1440
mez pevnosti (MPa)	35
modul pružnosti (MPa)	2500

4.2.2.4 Akrylonitril-butadien-styren

ABS je kopolymer složený ze tří hlavních monomerů: akrylonitrilu, butadienu a styrenu. Akrylonitril zajišťuje pevnost a chemickou a teplotní odolnost, butadien rázovou houževnatost a pružnost a styren tuhost. Jeho nevýhodou je nižší trvanlivost, vysoká hustota a vyšší cena.

Vlastnosti ABS jsou popsány v tabulce 4 níže.

Tab. 4. Vlastnosti ABS.

vlastnosti	ABS
vzorec	$(C_8H_8-C_4H_6-C_3H_3N)_n$
hustota (kg/m ³)	1040
mez pevnosti (MPa)	35
modul pružnosti (MPa)	2100

4.2.2.5 Recyklované polymery

Recyklováním plasty ztrácí svou čistotu a obecně se zhoršují jejich vlastnosti, zejména kvůli jejich degradaci, proto se pro výrobu WPC používají mnohem více plasty nově vyrobené. Nicméně i tak se v této oblasti tento trend uplatňuje. Častým řešením bývá kombinace nového plastu s recyklovaným, jako recykláty se používají např. víčka z PET lahví (prkna Relazzo, Rehau), plastové nákupní tašky (Trex).

Ve Finsku kombinují recyklované polymery dokonce s recyklovaným tepelně modifikovaným dřevem. Tyto recyklované polymery jsou označovány jako CIRCO recykláty a jsou vyráběny nejčastěji z průmyslových plastů a recyklovaných obalů (Fortum Circo, 2019).

4.2.3 Aditiva

4.2.3.1 Minerální plniva

Plniva se přidávají do plastů z několika důvodů: Fungují jako fungicidy, retardéry hoření, snižují působení UV záření a vlhkosti, zlepšují viskozitu taveniny, zlepšují mechanické vlastnosti. Jejich použití v oblasti dřevoplastů je menší, zejména kvůli navýšení ceny výrobků.

Vliv minerálních plniv na modul pevnosti v ohybu a modul pružnosti v ohybu je velmi rozdílný. Zatímco modul pevnosti v ohybu se přidáním minerálů zvýší cca o 10–20%, modul pružnosti se může zvýšit až o 200–400% (Klyosov, 2007).

Nejvíce se v plastovém průmyslu používá uhličitan vápenatý (CaCO₃), mastek, kaolin, slída a skelná vlákna. Výjimkou není ani použití nanočástic.

4.2.3.2 Spojovací činidla

Spojovací činidla jsou zvláštní skupinou dřevoplastových aditiv. Dříve byly nazývány síťovacími činidly, dnes se více používají termíny spojovací činidla či kompatibilizátory, neboť více vystihují funkci těchto aditiv. Tou je zlepšení kompatibility mezi celulózovými vlákny a polymery, zejména zvýšení vzájemné adheze nejčastěji prostřednictvím tvorby kovalentních vazeb, dále zvýšení disperze vláken v polymerech a zlepšení mechanických vlastností této tekuté hmoty.

Funkce zlepšení kompatibility spojovacích činidel se dělí na dvě funkční části: schopnost zaplétání či částečné krystalizace polymerů a interakce polymerů s vlákny pomocí kovalentních či ionových vazeb, vodíkových můstků apod. (Klyosov, 2007).

Vyjmenované vlastnosti splňuje řada materiálů: silikáty, titanáty, organické kyseliny, chlorotriaziny, anhydridy, epoxidy, izokyanáty, akryláty, silany, polymerní sloučeniny a další. Pouze některé z nich se v dřevoplastovém průmyslu používají. Můžeme je rozdělit na maleinované polyolefiny, které se vážou na celulózová vlákna pomocí vodíkových můstků, ionových vazeb či (údajně) kovalentních vazeb; ostatní bifunkční polymery a oligomery reagující s anorganickými plnivy vytvořením iontového páru; silany navázané na polymery a následně (údajně) tvořící kovalentní vazby s hydroxylovými skupinami celulózy; akrylicky modifikovaný polytetrafluorethylen (PTFE); chloroparafíny a ostatní kompatibilizátory (Klyosov, 2007).

Spojovací činidla mají významný vliv na snížení absorpce vody u WPC kompozitů, nicméně také zvyšují tahovou a ohybovou pevnost (někdy dokonce až o 200%). Vliv na modul pružnosti v ohybu a v tahu je ve většině případů nižší či dokonce zanedbatelný (Klyosov, 2007).

Maleinované polyolefiny

Tato skupina spojovacích činidel je v dřevoplastovém průmyslu nejpoužívanější. Skládají se z polyolefinů (zajišťujících propletení s polymerní maticí, nejčastěji jsou to PP a PE) a maleinanhydridu (vytvářejícího vazby s celulózovými vlákny). Asi nejběžnějším je v dnešní době maleinanhydrid-polypropylen (MAPP). Používá se většinou v množství 1–5 váhových procent WPC.

Silany

Silany se používají jako spojovací činidla zejména u WPC obsahujících minerální plniva. Obsahují chemickou skupinu (amino, epoxy, vinyl nebo alkyl) s vysokou afinitou k polymerní matici a skupinu tvořící kovalentní vazby s celulózovými vlákny. Nejlépe se silany vážou na matici tvořenou epoxidovou pryskyřicí, termoplasty bohužel neobsahují dostatek reaktivních skupin. Nejčastěji se používá 3–10 váhových procent silanu na WPC.

4.2.3.3 Pigmenty

Pigmenty jsou práškové barvy, většinou s vysokou krycí schopností. Nejsou rozpustné v polymerech. Přidávají se do směsi WPC za účelem zvýšení pohledové atraktivity výsledného produktu. Můžeme je rozdělit na organické (syntetické barvy), anorganické a práškové kovy.

4.3 Výrobní technologie WPC

Technologie výroby WPC je většinou dvoustupňová a vychází z tradiční výroby plastů. Ty se běžně obohacují o anorganické příměsi (např. mastek, uhličitan vápenatý či skelná vlákna) pro zlepšení vlastností tekuté plastové hmoty či konečného plastového produktu, není tedy náhodou, že se do WPC směsi přidávají aditiva.

O plnění plastů dřevními vlákny však byly zpočátku pochyby z důvodu jejich nízké objemové hmotnosti, nízké teplotní stability a absorpce vlhkosti. Plastikářský průmysl neměl v raném vývoji WPC materiálů dostatečné znalosti o dřevě, pokusy o výrobu kompozitů tak často selhávaly, což vedlo k celkové skepsi průmyslu ke kombinování těchto dvou materiálů (Rowell, 2005).

Kvůli nízké teplotní odolnosti dřeva se pro výrobu WPC materiálů používají z velké většiny termoplasty tavitelné za teploty nižší než 200 °C. Ty se ve formě granulí míchají s dřevními vlákny a aditivy, taví, homogenizují a následně formují do pelet určených k dalšímu zpracování nebo do konečného požadovaného tvaru. Tento proces se nazývá kompaundace (z anglického compound = směs, sloučenina, podle normy ČSN EN 15534-1 (2018) „homogenizovaná směs na bázi polymeru a celulózy s aditivou, jako např. pigmenty,

stabilizátory a dalšími, v dávce potřebné pro zpracování a zamýšlené použití finálního produktu“). Většinou po ní následuje další výrobní operace (tj. druhý stupeň výroby), a to nejčastěji extruze, nebo vstřikování.

4.3.1 Příprava surovin

Dřevní vlákna se skladují v silech, případně pytlech či krabicích. Do místa kompaundace se přepravují mechanicky šnekovými či pásovými dopravníky nebo pomocí pneumatických systémů (Oksman Niska a Sain, 2008). Z hlediska technologie výroby je velmi důležité, aby obsahovala co nejnižší vlhkost (udává se 1–2%), aby byla zajištěna dobrá mísitelnost s plasty (Rowell, 2005). Vzhledem k nízkému obsahu vlhkosti a velmi malé velikosti dřevních částic je tak materiál označován jako výbušný. Je proto nutné zajistit bezpečnou manipulaci s vlákny. Znamená to zamezení vzniku trojúhelníku hoření, přesněji vyloučení alespoň jedné z jeho tří složek. Těmi jsou hořlavá látka (v tomto případě dřevní vlákna; tuto složku eliminovat nelze), oxidační činidlo (kyslík) a iniciační zdroj. Nejjednodušší je eliminace iniciačního zdroje.

Termoplasty se připravují ve formě pelet či granulí, jak již bylo zmíněno výše. Na místo kompaundace se dopravují nejčastěji pneumatickými systémy.

4.3.2 Kompaundace

Kompaundací, čili mícháním jednotlivých složek kompozitu (tj. termoplastu, dřevních vláken a aditiv) vzniká výrobní polotovar ve formě pelet či granulátu. Tato peletizovaná (granulovaná) homogenní směs je dále skladována či ihned zpracovávána do finálního výrobku.

Klíčové je při tomto procesu optimalizovat způsob míchání, neboť nedostatečným mícháním může dojít k malému smáčení jednotlivých dřevních vláken a jejich rozptýlení v plastické hmotě, zatímco nadměrným mícháním může dojít k poškození vláken. V těchto případech dochází ke snížení mechanických vlastností (Yam a kol., 1990).

Kompaundace většinou probíhá v tzv. extrudéru, stroji, který se používá i pro extruzi. Extrudér je stroj tvořený násypkou, jednoduchým (případně dvojitým) šnekem a extruzní hlavicí v podobě granulátoru. Míchání probíhá otáčením šneku (šneků) extrudéru za zvýšené teploty. Vzniká tak tavenina, která je protlačována granulátorem do podoby granulátu (Oksman Niska a Sain, 2008).

4.3.3 Extruze

Extruze, neboli vytlačování, je typickým a nejlevnějším způsobem výroby dřevoplastových kompozitů. Extruze probíhá v tzv. jednošnekovém či dvojšnekovém extrudéru. Pomocí extruzní hlavice je vytlačován nekonečný profil, který většinou slouží jako polotovar pro deskové či trubkové díly.

Nejpoužívanějším typem extrudéru je typ jednošnekový, který se používá také pro kompaundaci. U dvoušnekových extrudérů rozlišujeme, zda je pohyb šneků souběžný či protiběžný. Protiběžné extrudéry se používají zejména pro výrobu WPC na bázi PP (Oksman Niska a Sain, 2008).

Rozlišujeme jednostupňový a dvojestupňový způsob extruzní výroby. U jednostupňového způsobu je extruze propojena s kompaundací do jedné pracovní operace, u dvojestupňového (častějšího) způsobu jsou tyto operace oddělené. Kvalita finálního produktu je u dvojestupňové výroby vyšší (Rowell, 2005; Oksman Niska a Sain, 2008).

4.3.4 Vstřikování

Vstřikování je nejpoužívanější výrobní operací v plastovém průmyslu. Je to dáno tím, že tato technologie umožňuje vytvořit poměrně složité výrobky, které již nepotřebují další opracování. Z tohoto důvodu byl tento způsob výroby převzat i pro výrobu složitějších WPC výrobků.

Výroba probíhá cyklicky v automatickém výrobním stroji, který sestává z násypky, válce s pohybovým šroubem a vstřikovací hlavice. Násypkou se do stroje sypou pelety, které jsou třením a otáčením šroubu zahřívány na taveninu. Do válce jsou dále přiváděny dřevní vlákna a aditiva, která se otáčením šroubu mísí s natavenými peletami a postupně vzniká homogenizovaná tavenina. Vstřikovací hlavice nakonec hmotu vstřikuje do formy. Ta se po zchlazení hmoty integrovaným chladícím zařízením otevře, výrobek je z ní vyhozen a následně se celý cyklus opakuje. Stroj je poháněn elektrickým, hydraulickým či hybridním pohonem (Oksman Niska a Sain, 2008).

Vstřikovací formy jsou často velmi drahé, vyrobené z oceli či hliníku pomocí CAD obrábění. Jejich cena je kompenzována vysokým množstvím výrobků, které je z nich možné vyrobit; u velmi přesných forem je to až 100 000 kusů.

4.4 Fyzikální vlastnosti dřevoplastů

Základními zjišťovanými fyzikálními vlastnostmi WPC jsou hustota, vlhkost a reaktivnost na vlhké prostředí, jako je bobtnání a sesychání. Dalšími důležitými fyzikálními vlastnostmi jsou koeficient smykového tření a teplotní deformace.

4.4.1 Hustota

Hustota je fyzikální vlastnost popisující objemovou hustotu, tj. kolik hmotnosti připadá na určitý objem materiálu. U porézních materiálů je závislá na působení vlhkosti, která se do pórů snadno dostane. Dřevo evropských dřevin má běžnou hustotu 450–650 kg/m³. Pro výrobu WPC se však používá v podobě dřevní moučky, která má hustotu vyšší (typicky ji nahrazujeme specifickou hustotou či hmotností), a to asi 1300 kg/m³. Hustota termoplastů se pohybuje většinou mezi 900–1400 kg/m³, např. u HDPE je to okolo 950 kg/m³. Smícháním dřevní moučky a HDPE v poměru 1:1 by odhadem měl vzniknout kompozit o hustotě 1125 kg/m³. Tak tomu však není z důvodu poréznosti materiálu. Díky vzniku dutin, které jsou vyplněny vzduchem, dosahuje výsledný kompozitní materiál hustoty mezi 900–950 kg/m³ (Klyosov, 2007).

Hustota ovlivňuje některé důležité vlastnosti WPC, jako například ohybovou pevnost. S poklesem hustoty klesá mez pevnosti v ohybu i modul pružnosti v ohybu. Nicméně, tyto parametry jsou ovlivnitelné (a v praxi se ovlivňují) minerálním plnivem, které navyšují hustotu kompozitů, proto se nedá říci, že by korelace mezi hustotou a pevností v ohybu souvisela s mírou poréznosti (Klyosov, 2007).

4.4.2 Vlhkost

Vzhledem k hygroscopické povaze dřeva je nutné zjišťovat vliv vlhkosti i u materiálů z něj vyrobených. S rostoucím obsahem vody ve dřevě se snižují fyzikální, mechanické vlastnosti i jeho trvanlivost, WPC jakožto materiály vyrobené ze dřeva nevyjímaje. Z toho důvodu provází technologické procesy zpracování dřeva sušení na minimální vlhkost nutnou pro daný finální materiál. Nevýhodou však je opětovná navlhavost dřeva.

Klyosov (2007) uvádí, že WPC při kontaktu s vodou absorbují během 24-hodinového působení 0,7–3 hmotnostních procent vody, což je asi 10x méně než dřevo (například tlakově modifikované dřevo absorbuje 24 hmotnostních procent při stejných

podmínkách). Podle Rowella (2005) se vzrůstajícím poměrem hydrofilních dřevních vláken vzrůstá míra absorpce vlhkosti kompozitu při vystavení materiálu vodnímu prostředí i vysoké relativní vlhkosti vzduchu. Klyosov (2007) dále soudí, že tato míra absorpce narůstá lineárně. Vlhkost je kompozitem vázána pomalu, ale narůstá i během delšího časového období.

Absorpce vlhkosti může vést k řadě úkazů, včetně bobtnání, prohýbání a vzniku plísní (Klyosov, 2007).

4.4.3 Bobtnání a sesychání

Působením vlhkosti mění dřevo své rozměry. Přemírou vody bobtná, nedostatkem naopak sesychá. S tímto jevem se setkáme taktéž u WPC materiálů, kde je závislý na hustotě – WPC s nižší hustotou více absorbují vodu a bobtnají více než WPC s hustotou vyšší. Navíc vážou vodu velmi pomalu, proto se i změny rozměrů jeví postupně (Klyosov, 2007).

Příklad bobtnání WPC materiálů je uveden v tabulce 5.

Tab. 5. Stranové bobtnání materiálu GeoDeck o různých hustotách. (Klyosov, 2007)

hustota (kg/m ³)	počáteční šířka (mm)	bobtnání (μm)			
		24 h	7 dní	14 dní	28 dní
1125	143	50	240	480	810
1150	145	40	140	330	580
1170	146	20	140	340	610
1210	146	20	150	340	580

4.4.4 Koeficient smykového tření

Tření popisujeme jako sílu tečnou na styčnou plochu mezi dvěma tělesy. Působí vždy proti směru pohybu a vyjadřuje sílu nutnou pro uvedení tělesa do pohybu po ploše (jiném tělese). Koeficient smykového tření je fyzikální veličina udávající poměr této třecí síly a na ní kolmé tlakové síly mezi tělesy.

Od smykového tření odvozujeme skluznost (či kluzkost), což je vlastnost zjišťovaná zejména u podlahovin z důvodu bezpečného pohybu osob. Míru skluznosti lze experimentálně změřit například pomocí zatížené kožené boty a zkoumaného materiálu na nakloněné rovině. Postupným nakláněním zkoumaného materiálu s umístěnou botou

najdeme úhel, při kterém bota začne klouzat dolů. Pro příklad si uvedeme, že u dřeva se tento skluzný úhel pohybuje okolo 29°, zatímco u WPC materiálů bývá v rozmezí 16–26°. Lze tedy říci, že WPC materiály mají obecně vyšší skluznost než dřevo (Klyosov, 2007).

4.4.5 Teplotní deformace

Téměř všechny pevné látky vykazují deformace v závislosti na změně teploty. Typicky se se vzrůstající teplotou roztahují a se snižující teplotou smršťují. Tato deformace je na teplotě lineárně závislá. Popisujeme ji koeficientem teplotní roztažnosti, který udává míru prodloužení (smrštění) při změně teploty materiálu o 1 °C.

U WPC materiálů je snaha tuto vlastnost snižovat. To lze dvěma způsoby: změnou poměru vstupních surovin, jako je menší množství plastu nebo výběr odlišných vláken, nebo změnou parametrů výrobní technologie (například zvýšením rychlosti extruze).

4.5 Mechanické vlastnosti dřevoplastů

Základní mechanické vlastnosti materiálů jsou vyhodnoceny na základě pěti různých typů namáhání. Těmi jsou: tah, tlak, ohyb, krut a střih. Tyto typy namáhání se graficky znázorňují jako silové vektory (příp. momenty sil) působící na normálovou nebo tečnou plochu tělesa.

Vlastnosti vyhodnocené pomocí těchto faktorů jsou například pevnost v tahu, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu, pevnost v krutu a pevnost ve střihu, které popisují odolnost proti těmto vnějším silám. S pevností souvisí pružnost, tj. schopnost vratné deformace tělesa. Většinou se nevyčleňuje jako samostatná vlastnost, přiřazuje se k pevnosti. Dále mezi základní mechanické vlastnosti patří plasticita, schopnost nevratné deformace, a houževnatost (a rázová houževnatost), schopnost tělesa odolávat deformacím bez tvorby trhlin (jedná se vlastně o kombinaci pevnosti a plasticity).

Pro lepší matematický popis pevnosti je zaváděna mez pevnosti. Je to charakteristika, udávající maximální hodnotu napětí, při které zůstává těleso celistvé. Pro důsledný popis pružnosti je zaváděna mez elasticity, tj. hranice, za kterou těleso není schopné vrátit se do původního stavu, a takzvaný modul pružnosti. Modul pružnosti vyjadřuje poměr napětí a jím vyvolané deformace. Čím je modul pružnosti větší, tím větší je napětí potřebné na vyvolání deformace. Nutno dodat, že všechny tyto mechanické vlastnosti je možno vyčíst z grafu závislosti napětí na relativním prodloužení.

Dále existují mechanické vlastnosti odvozené, či někdy nazývané mechanické charakteristiky či materiálové charakteristiky. Důležitou charakteristikou odvozenou od tlakového napětí je tvrdost. Mezi další mechanické charakteristiky patří např. odolnost proti otěru.

Ve srovnání s masivním dřevem je obecně většina mechanických vlastností WPC materiálů vylepšená. Stejně tak je mnoho vlastností WPC materiálů lepších než vlastnosti polymerů. Je to dáno jak přidanými aditivami, tak synergickým efektem kombinace těchto dvou materiálů.

Mezi zmiňované vylepšené vlastnosti patří zejména modul pružnosti, modul pevnosti a pevnost v tlaku. Míra houževnatosti a rázové houževnatosti závisí na použitých polymerech. Zvýšením houževnatosti se zvyšuje odolnost proti vzniku trhlin a snižuje se míra křehnutí při normálních (pokojevých) teplotách (Li, 2011).

4.5.1 Zkoušky mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti jsou vyhodnocovány pomocí tří typů zkoušek. Těmi jsou:

- 1) zkoušky statické,
- 2) zkoušky dynamické,
- 3) zkoušky únavové.

Nejvíce používanými jsou statické zkoušky, založené na statickém působení síly na zkušební těleso. Zkušební těleso je tak namáháno postupně vzrůstající silou až do dosažení maximální deformace tělesa.

Dynamické zkoušky spočívají v použití dynamické síly. To znamená namáhání zkušebního tělesa prostřednictvím tělesa o nenulové počáteční kinetické energii. Síla působící na těleso tak není postupně vzrůstající, ale náhlá. Mezi tyto zkoušky patří rázové zkoušky (např. zkouška vrubové houževnatosti podle Charpyho) a zkoušky odrazem.

Zkoušky únavové jsou důležité k určení časové výdrže materiálu. Jedná se o dynamické zkoušky opětovným (cyklickým) namáháním. Namáhání se periodicky mění od nejvyšší po nejvyšší hodnotu. Zkoumaná časová výdrž materiálu je popisována jako mez únavy, tj. největší hodnota napětí, při kterém součást zhotovená ze zkoumaného materiálu vydrží teoreticky neomezený počet cyklů změn zatížení.

4.5.2 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu je mechanická vlastnost popisující odolnost tělesa vůči ohybovému namáhání. Je to nejvíce zkoumaná mechanická vlastnost u WPC materiálů. U WPC materiálů se zkoumá podle normy EN ISO 178 (2011) nebo EN 310 (1995).

Zkoumanými charakteristikami pevnosti v ohybu jsou mez pevnosti v ohybu (MOR, tj. modulus of resistance) a modul pružnosti v ohybu (MOE, tj. modulus of elasticity).

U dřevěných materiálů rozlišujeme dva typy pevnosti v ohybu, s ohledem na průběh dřevních vláken: Pevnost v ohybu při síle působící napříč vlákny a pevnost v ohybu při síle působící ve směru orientace vláken. WPC materiály mají částice vláken orientovány většinou neuspořádaně, lze je tedy v tomto ohledu považovat za homogenní; není potřeba vyčleňovat více typů působících sil než jeden.

Polymerní materiály, zvláště HDPE, se běžně na mez pevnosti v ohybu nezkoumají, neboť v laboratorních podmínkách nedochází k jejich zlomu. Některá data uvádějí, že mez pevnosti HDPE se pohybuje okolo 9,6 MPa, u PP může mez pevnosti v ohybu dosahovat 48 MPa a u PVC až 110 MPa. Modul pružnosti je u polymerů poměrně vysoký: HDPE dosahuje asi 0,86–1,65 GPa, PP 1,17–1,72 GPa a PVC 2,62–3,72 GPa. WPC výrobky na bázi PVC však běžně dosahují asi třetiny až poloviny těchto hodnot (Klyosov, 2007).

Podle Klyosova dosahuje ohybová pevnost dřeva 138 MPa, zatímco ohybová pevnost polymerů činí pouze 9 MPa. Ve zjednodušeném příkladu by ohybová pevnost kompozitu s 50% dřevní výplně a 50% polymerní matrice měla teoreticky dosahovat asi 117 MPa. Ve skutečnosti je to však méně, u komerčních produktů asi 10–30 MPa, u laboratorních vzorků až 60 MPa. Na ukázkou je níže uvedena tabulka 6 popisující srovnání ohybových charakteristik u WPC z borovice a PP a u jeho jednotlivých složek.

Vliv na ohybovou pevnost má i úprava poměru jednotlivých složek kompozitu, jak je popsáno v tabulce 7.

Kromě složek WPC kompozitu má na ohybovou pevnost vliv také hustota materiálu. Rozdílné hustoty lze dosáhnout odlišným nastavením výrobních parametrů, jako rychlost lisování, vlhkost dřevních vláken a podobně. Obecně platí, že čím je hustota WPC větší, tím je větší i jeho pevnost. Ne vždy je však výsledek úplně konzistentní, viz tabulka 8 (Klyosov, 2007).

Tab. 6. Srovnání ohybových charakteristik u PP, WPC a borovice (Rowell, 2005).

materiál	mez pevnosti (MPa)	modul pružnosti (GPa)
PP	28,7	1,39
67% PP / 33% dřevo	49,3	3,19
borovice	88,3	12,34

Tab. 7. Vliv poměru složek kompozitu na ohybové charakteristiky (Klyosov, 2007).

poměr HDPE / rýžové slupky (%)	mez pevnosti (MPa)	modul pružnosti (GPa)
37/63	13,2	2,2
50/50	>16,5	1,4

Tab. 8. Vliv hustoty na ohybové charakteristiky(GeoDeck) (Klyosov, 2007).

hustota (kg/m ³)	mez pevnosti (MPa)	modul pružnosti (GPa)
1070	15,5	1,2
1100	15	1,5
1120	16,5	1,8

4.5.3 Pevnost v tahu

Pevnost v tahu je mechanická vlastnost, která nepatří mezi běžně zkoumané parametry WPC, neboť není vyžadována normou. Pokud vyžadována je, zkoumá se nejčastěji podle normy EN ISO 527-2 (2012). Při laboratorní zkoušce se zkoumá prodloužení vzorku následkem tahového namáhání a plocha lomu.

WPC materiály na bázi HDPE vykazují nižší mez pevnosti v tahu, než čisté HDPE, stejně tak materiály na bázi PP. S vyšším obsahem lignocelulózových vláken se mez pevnosti snižuje (Klyosov, 2007).

Modul pružnosti v tahu je obecně vyšší u polymerů s vyšším stupněm krystalinity. Není jasné, zda je tomu tak i kompozitů na bázi polymerů, zdá se ale, že jej zvyšuje přítomnost dřevních vláken (Klyosov, 2007).

Pro přehled tahových charakteristik u nejčastěji používaných termoplastů v dřevoplastovém průmyslu je níže uvedena tabulka 9. V tabulce 10 je možno pozorovat srovnání těchto charakteristik u WPC materiálu a jeho jednotlivých složek.

Tab. 9. Srovnání tahových charakteristik u vybraných termoplastů (Klyosov, 2007).

materiál	mez pevnosti (MPa)	modul pružnosti (GPa)
HDPE	20-30,3	1,17
PP	31-41,3	1,3
PVC	38-55	2,83

Tab. 10. Srovnání tahových charakteristik u PP, WPC a borovice (Rowell, 2005).

materiál	mez pevnosti (MPa)	modul pružnosti (GPa)
PP	27,6	1,39
67% PP / 33% dřevo	33,1	3,38
borovice	90,4	7,6

4.5.4 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je opět vlastnost standardně nepodléhající normovaným parametrům WPC materiálů. Při laboratorní zkoušce je vzorek stlačen a zkoumá se míra stlačení a zda dojde k lomu, či nikoli.

Podobně jako modul pružnosti v tahu, i modul pružnosti v tlaku se zvyšuje se stupněm krystalinity polymerů (Klyosov, 2007).

Hodnoty pevnosti v tlaku u nejvíce používaných termoplastů pro výrobu WPC jsou popsány v tabulce 11.

Tab. 11: Srovnání tlakových charakteristik u vybraných termoplastů.

materiál	mez pevnosti (MPa)	modul pružnosti (GPa)
HDPE	20-30	0,7
PP	38-45	1,5
PVC	69-76	nezjištěno

4.6 Technologické vlastnosti dřevoplastů

4.6.1 Tvrdost

Tvrdost je vlastnost, která popisuje schopnost materiálu odolávat deformaci. Lze ji popsat jako odvozenou mechanickou charakteristiku od tlakového namáhání. Klasickou metodou měření tvrdosti je statická metoda vtlačování velmi tvrdého tělesa o známém tvaru

do zkušebního vzorku materiálu. Výsledek měření se vypočítá jako poměr použité tlakové síly a velikost otisku tělesa. Známe několik typů těchto zkoušek, z nichž nejpoužívanější je statická zkouška tvrdosti podle Brinella, která spočívá ve vtlačování ocelové kuličky do zkušebního tělesa.

Tvrdomost WPC závisí z větší části na tvrdosti a zpracování použitého polymeru a na jeho poměru vůči dřevním částicím (Li, 2011).

4.6.2 Odolnost proti otěru

Otěruvzdornost je vyjádřena tzv. Taberovým indexem opotřebení, který je určen ztrátou hmotnosti způsobenou abrazivním prostředkem. Čím menší je ztráta hmotnosti, tím menší je opotřebovanost materiálu.

Měření se provádí na Taberově abrazimetru. Zkouška spočívá v upevnění vzorku materiálu na rotační plošinu abrazimetru a následnému přitlačení dvou brusných kotoučů ke vzorku. Otáčením plošiny se vzorkem vzniká mezi vzorkem a kotouči tření; jeden brusný kotouč tře vzorek směrem ven k obvodu a druhý směrem ke středu. Po dokončení celých 360° kruhu je pomocí kotoučů změřena odolnost proti otěru ve všech úhlech k povrchu materiálu.

Obecně se otěruvzdornost zvyšuje s množstvím polymeru v kompozitu. Spojením částic měkkých dřevin, jako bříza a olše, s polystyrenem bylo dosaženo stejné otěruvzdornosti, jakou vykazuje dubové dřevo (Li, 2011; Taber Industries, 2018).

4.7 Oblasti využití dřevoplastových materiálů

WPC výrobky slouží ve většině případů jako náhrada dřeva; tak jsou i konstruovány. Úvahou lze dospět k tomu, že se dají použít všude tam, kde se používají výrobky dřevěné, s ohledem na vlastnosti WPC materiálů. Velkou výhodou z hlediska rozměrové a vzhledové stálosti ale nabízejí v oblasti stavebních doplňků, jako jsou třeba okenní rámy a žaluzie, dále podlahovin, obkladů a plotů. Výjimkou není ani výroba WPC zahradního nábytku či městského mobiliáře. V poslední době se objevují WPC materiály na trhu hraček, příborů a zejména stavebních výrobků, často v souvislosti se zahradní architekturou – z WPC se vyrábí sloupy, nosníky i střešní krytina. Speciální oblastí využití WPC materiálů je automobilový průmysl.

V roce 2012 dosáhla evropská produkce WPC materiálů 260 tisíc tun, z toho 45% bylo vyrobeno v Německu. Prognózou pro rok 2020 je zdvojnásobení produkce (Carus a kol., 2015).

4.7.1 Podlahoviny

Podlahová prkna jsou u nás nejrozšířenější skupinou WPC výrobků. Podle studie WPC/NFC Market Study z roku 2015 (Carus a kol.) dosáhla výroba WPC podlahovin v roce 2012 67% celkové evropské WPC produkce.

Nejčastěji se podlahová prkna používají do exteriéru na skladbu teras, případně mol, nebo na obložení bazénů. Ve většině případů bývají rýhované či jinak reliéfované, čímž je dosaženo vyšší protiskluzovosti povrchu.

Podlahová prkna se rozdělují do dvou skupin dle svého tvaru: První skupinou jsou podlahová (či obkladová) prkna, ty mohou být buď s dutým nebo plným profilem. Dutá prkna se vyrábí zejména z ekonomických důvodů, neboť jsou díky menšímu obsahu materiálu levnější. Mají ovšem menší nosnost a hrozí u nich riziko popraskání vlivem mrazu. Druhá skupina WPC podlahovin zahrnuje různé kvadratické dlaždice (kazety) nebo zámkové dílce.

Výrobci podlahovin často spojují svou výrobu s výrobou fasádních obkladů a plotů. Největším českým výrobcem WPC podlahovin je firma Woodplastic (viz obr. 1), která vyrábí produkty z 60% dřevní moučky a 40% HDPE a k podlahovým prknům dodává i spojovací a kotvicí systém – nosníky + klipy, vruty, lišty apod. Dalšími českými výrobci jsou firmy Perwood (50% BK/BO, 50% PVC), Nextwood (50% dřevní moučky, 38% HDPE, 12% aditiv) a BET System (50-60% dřevní moučky, 40-50% směs polymerů).

Mezi nejznámější zahraniční výrobce patří Trex Company (USA), Fiberon (USA), Einwood (Japonsko) a Lunawood (Finsko, kombinace thermowood a recyklovaných plastů) (Klyosov, 2007; Lunawood, 2017). V posledních letech se na trhu s WPC výrobky velmi zviditelnila také Čína. Mezi čínské výrobce patří např. Grinwood, New Insight a HoH Ecotech.



Obr. 1. Terasa Forest Plus Palisander (Woodplastic, 2019).

4.7.2 Fasádní obklady a ploty

Výrobci WPC podlahovin se dále zaměřují na výrobu obkladů na fasády a výrobu plotních planěk. Výrobní specifika jsou si podobná, rozdíl je hlavně v tom, že obklady a plaňky se aplikují (převážně) ve vertikální poloze. Jejich povrch je upravován od jemného broušení po drážkování. Velmi oblíbené jsou povrchy napodobující strukturovaný povrch dřeva (Nextwood, 2019; Perwood, 2019; Woodplastic, 2019). Ukázka plotu s aplikací WPC planěk je uvedena na obrázku 2.



Obr. 2. Plot z plotových prken Massive (Perwood, 2019).

4.7.3 Nábytek

Dřevoplastový nábytek u nás zatím příliš rozšířený není, ve světě ale pomalu získává na oblibě, a to zejména v exteriérové aplikaci. Můžeme se tak setkat se zahradním nábytkem i městským mobiliářem. Často se jedná o výrobky složitější konstrukce, vyráběné

technologí vstřikování. Mezi výrobce WPC nábytku se řadí např. Jeluplast (Německo), Advance Plastic Recycling (Austrálie) a Hardy Smith (Indie). V největší míře se s ním můžeme setkat v Číně a Austrálii (Defonseka, 2014). Na obrázku 3 je zobrazena ukázka městského mobiliáře v Austrálii.



Obr. 3. Městský mobiliář (Advance Plastic Recycling, 2017).

4.7.4 Automobilový průmysl

Automobilový průmysl byl první oblastí, kde se začaly vyrábět výrobky z WPC (viz kapitola 4.1 Historie dřevoplastových kompozitů). V dnešní době dosahuje WPC produkce pro automobilový průmysl cca 20–25% z celkové evropské WPC produkce (Carus a kol., 2015). Větší poptávka po těchto materiálech je v USA, Evropské země směřují spíše cestou přírodních kompozitů. (Rowell, 2005) V roce 2012 zaujímaly plastové kompozity s dřevní výplní pouze 38% celkové evropské produkce kompozitů pro automobilový průmysl (Carus a kol., 2015).

Mezi WPC výrobky pro automobilový průmysl se řadí dveřní vložky, palubní desky, obložení interiéru, či jiné součásti interiéru (viz obr. 4). Nejčastěji se jedná o výrobky na bázi polypropylenu.



Obr. 4. Polotovar opěrky hlavy (Jeluplast, 2019).

Podle Defonseky (2014) je oblastí s velkým potenciálem a rostoucím zájmem pro rozvoj WPC výrobků, související s automobilovým průmyslem, oblast silničních doplňků, jako jsou ochranná zábradlí, protihlukové zábrany, dopravní kužely a značky a svodidla.

5. Metodika

V diplomové práci byly zkoumány vybrané mechanické vlastnosti pěti skupin WPC materiálů. Tyto materiály jsou popsány v tabulce 12 níže.

Tab. 12. Zkoumané varianty materiálů.

varianta	lignocelulóзовý materiál	plast	podíl plastu	podíl LC	podíl aditiv	barvivo	povrch
1	stonky řepky	PE	50%	38%	12%	žádné	nebroušený
2	dub	PE	30%	58%	12%	hnědé	nebroušený
3	dub	PE	30%	58%	12%	oranžové	nebroušený
4	dub	PE	30%	58%	12%	černé	nebroušený
5	teak	PE	30%	58%	12%	červené	broušený

Řešení práce je rozděleno do tří témat, podle tří zvolených mechanických vlastností:

- 1) pevnost v ohybu,
- 2) tvrdost podle Brinella a
- 3) přídržnost povrchu.

Jednotlivé metodiky jsou podrobně popsány níže, zvláště ke každé zkoumané vlastnosti.

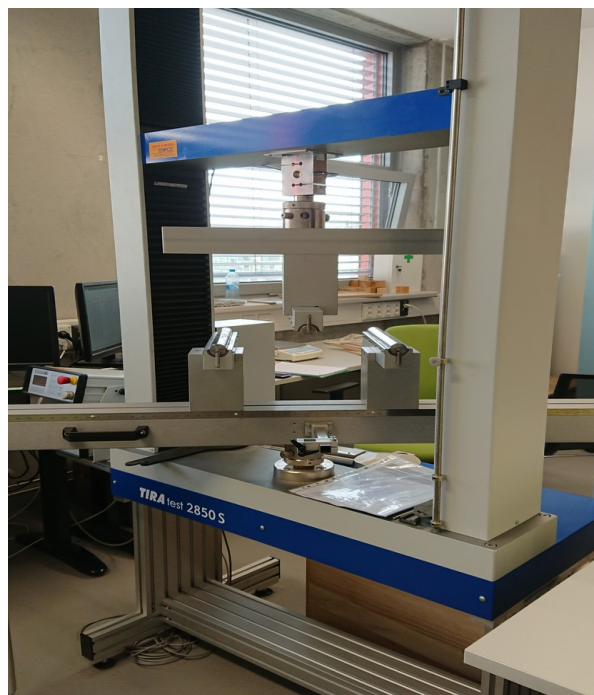
5.1 Zkouška pevnosti v ohybu

Metodika pro tuto zkoušku je odvozena z normy ČSN EN 310 (1995) pro stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu pro dřevěné deskové materiály o jmenovité tloušťce rovné nebo větší než 3 mm. Jedná se o normu používanou pro nenosné konstrukce. Vzhledem k odlišnosti zkoumaného materiálu je metodika upravena.

Podstata zkoušky spočívá ve středovém zatížení zkušebního tělesa, uloženém na dvou podpěrách. Modul pružnosti se vypočítá z lineární části zatěžovací křivky. Jedná se o zdánlivý modul, protože zkušební metoda zahrnuje kromě ohybu také smyk. Ohybová pevnost se vypočítá stanovením poměru ohybového momentu M při maximálním zatížení F_{max} k momentu jeho celého průřezu (ČSN EN 310, 1995).

5.1.1 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení, neboli trhací zařízení, v němž probíhá zatěžování tělesa, obsahuje dvě podpěry o průměru 15 ($\pm 0,5$) mm s možností volného otáčení kolem osy. Délka těchto podpor je větší, než šířka zkušebního tělesa. Vzdálenost mezi podpěrami musí být nastavitelná. Součástí zařízení je válcová zatěžovací hlava stejné délky jako podpěry a průměru 30 ($\pm 0,5$) mm. Musí být umístěna rovnoběžně s podpěrami, ve stejné vzdálenosti od obou. Součástí zařízení je měřidlo schopné měření průhybu zkušebního tělesa s přesností na 0,1 mm a měřicí systém pro měření zatížení s přesností 1 % z naměřené hodnoty. Pro tuto metodiku bude použito trhací zařízení Tira Test 2850 S (viz obr. 5).



Obr. 5. Tira Test 2850 S.

5.1.2 Zkušební tělesa

Příprava zkušebních těles (vzorků) se provádí podle EN 326-1 (1997). Vzorky použité v této metodice jsou nařezány na rozměr 340x50x15 mm. V případě materiálu první varianty je pro většinu vzorků zvolen rozměr 340x20x16 mm. Menší šířka vzorků materiálu první varianty je vybrána z důvodu nedostatku tohoto materiálu.

5.1.3 Postup zkoušky

Nejprve se změní rozměry každého zkušební tělesa podle EN 325 (2012). Vzdálenost mezi středy podpěr na přístroji se nastaví na 20tinásobek jmenovité tloušťky desky, v tomto případě na 300 mm. Zkušební těleso se položí na plochu na podpěry, podélnou osou v pravém úhlu k podpěrám a středem pod zatěžovací hlavu.

Zatížení se provádí při konstantní rychlosti posuvu. Změří se průhyb uprostřed zkušební tělesa s přesností na 0,1 mm. Tato hodnota je zanesena do grafu. Dále se zaznamená maximální zatížení s přesností 1 % z naměřené hodnoty.

Hodnoty modulu pružnosti v ohybu E (v N/mm^2) a pevnosti v ohybu f (v N/mm^2) jsou vypočítány pomocí Matess software. Pevnost v ohybu je vyjádřena pomocí meze úměrnosti.

Provede se celkem patnáct měření pro každou variantu materiálu.

5.2 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Princip této statické zkoušky tvrdosti byla odvozena od norem ČSN EN ISO 6506-1 (2015) pro kovové materiály a ČSN EN 1534 (2011) pro podlahoviny. Pro kompozitní materiály tedy byla metodika upravena.

Princip zkoušky spočívá v zatlačování vnikacího tělesa, v tomto případě kuličky z karbidu wolframu o průměru D , do povrchu zkušební tělesa. Po odlehčení zkušební zatížení, F , se měří průměr vtisku, d , který zůstane na povrchu tělesa.

5.2.1 Zkušební zařízení

Zkušebním zařízením pro tuto zkoušku je zkušební stroj schopný vyvinout předem stanovené zkušební zatížení – tvrdoměr. Součástí zařízení je vnikací těleso v podobě kuličky z karbidu wolframu specifikovaná v ISO 6506-2 (2015). Stroj je napojen na systém pro měření průměru vtisku, podle specifikace v ISO 6506-2 (2015). Konkrétním zařízením použitým v této metodice bude použit tvrdoměr Struers DuraVision-30 (viz obr. 6).



Obr. 6. Struers DuraVision-30.

5.2.2 Zkušební vzorky

Pro tuto zkoušku postačí vzorky použité ve zkoušce pevnosti v ohybu. Důležitým parametrem vzorků pro tuto zkoušku je hladkost, rovinnost a čistota povrchu horní plochy vzorků. Tloušťka zkušebního vzorku musí dosahovat alespoň osminásobku hloubky vtisku. V případě této konkrétní metodiky je tloušťka vzorku 15 (16) mm.

5.2.3 Postup zkoušky

Doporučené mikroklima pro zkoušku je 10–35 °C, těsněji 23 (±5) °C.

Zkušební vzorek se umístí na tuhou podpěru stroje a zajistí se proti posuvu. Vnikací těleso se přiblíží ke zkoušenému povrchu a v kolmém směru se zatěžuje až do dosažení stanovené hodnoty. Během zkoušky je nutné stroj zabezpečit proti otřesům a vibracím, které by mohly ovlivnit výsledek zkoušky.

Optické měření průměru vtisku zajistí automatický měřicí systém. Ten následně vypočte hodnotu tvrdosti podle vzorce

$$HBW = \frac{0,102 \times 2 F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \quad (1)$$

kde F je zkušební zatížení (v Newtonech), D je průměr vnikací kuličky (v milimetrech) a d je střední průměr vtisku (v milimetrech). Číslo $0,102$ představuje převodní konstantu.

Zvolená hodnota síly pro tuto zkoušku je 500 N a zvolený průměr vnikací kuličky je 10 mm.

Jednotlivé vtisky na jednom zkušebním vzorku se provedou ve vzdálenosti alespoň 2,5 násobku středního průměru vtisku od okraje a trojnásobku středního průměru vtisku mezi sebou. Proveďte se dvacet měření pro každou variantu ze zkoumaných materiálů, specificky po čtyřech měřeních celkem na pěti vybraných vzorcích.

5.3 Zkouška přídržnosti povrchu

Metodika této zkoušky je odvozena z normy ČSN EN ISO 4624 (2016) – Odtrhové zkoušky přílnavosti pro nátěrové hmoty a normy ČSN EN 311 (2003) – Přídržnost povrchu pro desky ze dřeva. Podstata zkoušky spočívá v připevnění zkušebního tělíska lepidlem k zkoumanému podkladu a po vytvrzení lepidla jeho následnému odtržení pomocí zařízení vhodného pro zkoušku tahem. Při zkoušce se měří síla potřebná k odtržení tělíska od podkladového materiálu. „Výsledkem zkoušky je tahové napětí nezbytné k rozlomení nejslabšího rozhraní (adhezní porušení) nebo nejslabší složky (kohezní porušení zkoušené sestavy) (ČSN EN ISO 4624, 2016).“

5.3.1 Zkušební pomůcky

5.3.1.1 Zařízení pro zkoušku tahem

Pro měření síly nutné k odtržení tělíska od podkladu se používá speciální odtrhové zařízení pro zkoušku tahem. To se skládá z držáku tělíska, pohybového šroubu, otočného zatěžovacího ramena a přípojného měřicího přístroje. V této metodice bude použito zařízení Coming 1P 20 (viz obr. 7).



Obr. 7. Coming 1P 20.

Místo tohoto zařízení lze použít i jiná zařízení na mechanickém, pneumatickém, hydraulickém či ručním principu, tato ale nebudou v této metodice použita.

5.3.1.2 Zkušební tělíska

Tělíska použitá v této metodice jsou válcovitého tvaru o průměru 20 mm a délce větší než je polovina průměru, s hladkou rovnou základnou pro pevné spojení se zkoumaným podkladem. Opačný konec tělísek je uzpůsobený pro uchycení v odtrhovém zařízení pomocí šroubového uzávěru. Materiál použitých tělísek je hliník a v některých případech ocel. Tento materiál je vybrán především z důvodu nulové deformace při zkoušce a snadnosti čištění po ní.

5.3.1.3 Lepidlo

Pro tuto zkoušku bude použito dvousložkové epoxidové lepidlo, které vykazuje vhodné vlastnosti z hlediska požadavků této metody. Těmi jsou výborná soudržnosti a přilnavost k povrchu. Pro účely této zkoušky je nutné, aby tyto vlastnosti byly u lepidla lepší než u zkoumaného materiálu.

Lepidlo bude nutné očistit podél obvodu přilepeného tělíska pomocí speciální ruční frézy. Tento nástroj umožňuje odřezání přebytečného okolního lepidla jednoduchým nasazením na tělíska a následným otáčením okolo něj za vyvinutí tlakové síly.

5.3.2 Zkušební vzorky

Zkušební vzorky jsou vybrány pro materiály popsané v tabulce 12 v úvodu této kapitoly. Pro účely této zkoušky postačí vzorky použité ve zkoušce pevnosti v ohybu. Důležité je zachování rovnosti a čistoty povrchu vzorků. Pro lepší přídržnost lepidla bude povrch vzorků zdrsňen brusným papírem číslo P 120 (240).

5.3.3 Postup zkoušky

Zkouška se provádí při teplotě 23 (± 2) °C a relativní vlhkosti vzduchu 50 (± 5) %. Na připravená tělíska se nanese rovnoměrná vrstva lepidla potřebná k vytvoření pevného, souvislého a rovnoměrného spojení se zkušebním vzorkem. Tělíska se přiloží k povrchu zkušebního vzorku a zatíží závažím po dobu vytvrzování lepidla (v tomto případě 24 h) pro zajištění spoje. Tímto vznikne zkušební sestava.

Po uplynutí vytvrzovací doby se provede řez ruční frézou po obvodu tělíska až na podklad. Následně se zkušební sestava umístí do odtrhového zařízení. Tělíska je pomocí závitu našroubováno do držáku na konci pohybového šroubu zařízení. Na zkušební sestavu se působí konstantním tahovým napětím vyvolaným pomalým otáčením zatěžovacího ramene. Napětí působí „kolmo k rovině podkladu tak, aby porušení zkušební sestavy nastalo do 90 s od začátku působení napětí“ (ČSN EN ISO 4624, 2016).

Po odtržení tělíska se zaznamená maximální tahové napětí, které způsobilo roztržení sestavy, a charakter lomu. Tahové napětí, σ (v MPa), zaznamená měřicí přístroj podle vzorce

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

kde F je tahová síla (v Newtonech) a A je plocha zkušebního tělíska (v milimetrech).

Pro tělíska o průměru 20 mm lze vzorec upravit následovně:

$$\sigma = \frac{F}{\left(\frac{20}{2}\right)^2 \pi} = \frac{F}{100 \pi} \quad (3)$$

Charakter lomu se stanoví podle následujícího klíče:

A = kohezní porušení v substrátu

-/Y = adhezní porušení mezi substrátem a lepidlem

Y = kohezní porušení v lepidle

Y/Z = adhezní porušení mezi lepidlem a tělískem

Pro každý typ lomu se odhadne plocha lomu v procentech se zaokrouhlením na 5%.

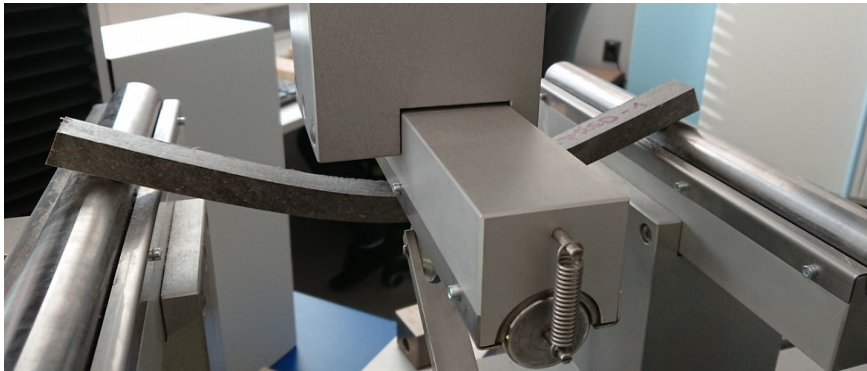
Provede se minimálně šest měření od každé skupiny vzorků.

6. Výsledky a diskuze

6.1 Pevnost v ohybu

Zjišťovanými charakteristikami pevnosti v ohybu byl modul pružnosti v ohybu a pevnost v ohybu vyjádřená mezí úměrnosti. Mez úměrnosti je vždy nižší než mez pevnosti materiálu.

Modul pružnosti v ohybu se u komerčních variant pohyboval okolo 4500 MPa, zatímco u řepkové varianty to bylo přibližně 1200 MPa, tedy téměř čtyřikrát méně (viz tab. 13). U meze úměrnosti byl zaznamenán větší rozptyl naměřených hodnot mezi jednotlivými materiály. WPC s řepkovým plnivem vykazoval nejvyšší mez úměrnosti, průměrně 15,64 MPa (viz tab. 14). Tento materiál také jako jediný dosahoval velkého průhybu okolo 30 mm (obr. 8) a nedosáhl ve stanovených laboratorních podmínkách bodu zlomu; zatěžovací zkouška trvala přibližně pětikrát déle než u ostatních WPC materiálů. Ostatní materiály vykazovaly průhyb do 10 mm (obr. 9).



Obr. 8. Zatěžování 1. varianty (větší průhyb).



Obr. 9. Zatěžování 2. varianty (menší průhyb).

Norma v uvedeném případě velkého průhybu bez nastání zlomu doporučuje redukovat vzdálenost podpěr, nicméně pro tento postup nebyl dostatek vzorků. Bylo postupováno stejným způsobem jako u ostatních variant materiálu, které byly změřeny nejdříve, aby bylo možno výsledky vzájemně porovnat. Z tohoto důvodu je porovnávána mez úměrnosti materiálů – meze pevnosti nebylo u prvního materiálu dosaženo.

Ze statistiky lze odvodit, že největší rozptyl měřených hodnot byl zaznamenán u varianty s řepkovým plnivem (viz tab. 13 a 14).

Tab. 13. Průměrné hodnoty modulu pružnosti v ohybu (MOE).

varianta	MOE (MPa)	směrodatná odchylka (MPa)	variační koeficient (%)
1	1 188,54	185,47	15,61
2	4 504,65	76,51	1,70
3	4 536,42	117,39	2,59
4	4 437,70	91,48	2,06
5	4 574,80	85,94	1,88

Tab. 14. Průměrné hodnoty meze úměrnosti v ohybu.

varianta	mez úměrnosti (MPa)	směrodatná odchylka (MPa)	variační koeficient (%)
1	15,64	7,90	50,53
2	9,43	0,56	5,96
3	6,59	1,75	26,55
4	6,94	0,62	8,93
5	5,90	1,69	28,60

Neobvyklý průběh zkoušky u řepkového WPC byl způsoben odlišným poměrem složek kompozitu, přesněji vyšším obsahem polymeru. Polymery vykazují vyšší ohybovou deformaci než dřevo. Modul pružnosti polyethylenu (HDPE) je přibližně 1000 MPa, proto byla u kompozitu s jeho vyšším obsahem zaznamenána nižší hodnota modulu pružnosti než u ostatních materiálů. Po vyjmutí vzorků ze zkušebního zařízení byl patrný menší průhyb než ten zaznamenaný během zkoušky, u WPC s řepkovým plnivem tudíž byla pozorována pružná deformace.

Výsledky charakteristik ohybové pevnosti jsou srovnatelné s hodnotami podlahových prken GeoDeck (Klyosov, 2007) popsány v kapitole 4.5 o mechanických vlastnostech WPC.

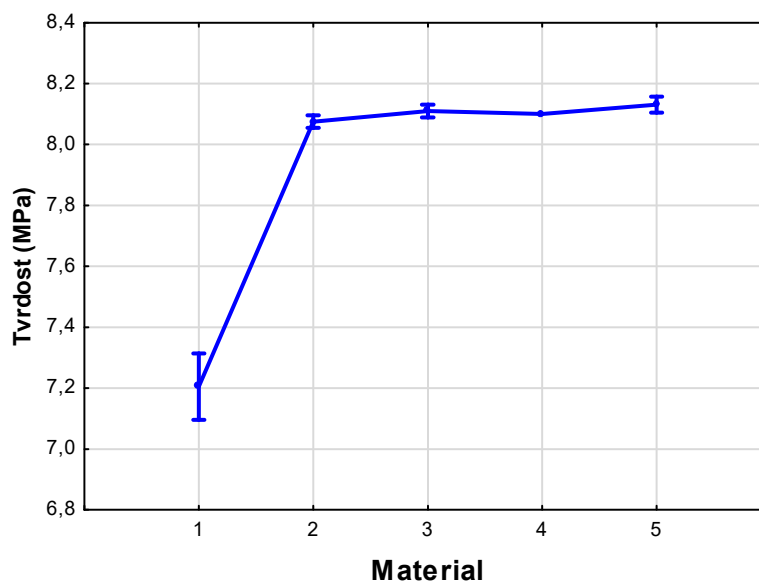
V porovnání s deskou z lisovaných stonků řepky ozimé bez použití lepidla dosahuje WPC kompozit s tímto plnivem asi třikrát nižší hodnoty pevnosti (nutno však podotknout, že v případě WPC se jedná o mez úměrnosti, mez pevnosti je cca o 5–15% vyšší); bylo zjištěno, že desky z lisovaných řepkových stonků dosahují ohybové pevnosti okolo 43–53 MPa, v závislosti na hustotě desky (Huang a kol., 2016).

6.2 Tvrdość podle Brinella

Ze zkoušky tvrdosti vyšla průměrná hodnota pro WPC materiály velice podobně: komerční varianty všechny vykazovaly průměrnou hodnotu 8,1 MPa. Řepkové WPC se mírně lišilo, průměrně dosahovalo hodnoty 7,2 MPa; avšak s vyšším variačním koeficientem (viz tab. 15 a obr. 10).

Tab. 15. Průměrné hodnoty tvrdosti.

varianta	tvrdost (MPa)	variační koeficient (%)
1	7	3,2
2	8	0,6
3	8	0,6
4	8	0
5	8	0,7



Obr. 10. Graf závislosti tvrdosti podle Brinella na materiálu.

1 – WPC-řepka, 2 – WPC-dub, 3 – WPC-dub, 4 - WPC-dub, 5 – WPC-teak.

Nelze s určitostí odhadnout, zda má na tvrdost WPC materiálů vliv použitý lignocelulózový materiál, resp. tvrdost dřeviny, ze které pochází. Ve zkoumaných komerčních variantách byla jako plnivo použita vlákna tvrdých dřevin. DebaBohemia (2007) pro dub uvádí hodnotu Brinellovy tvrdosti cca 3,7 MPa a pro teak 3,5 MPa při relativní vlhkosti 12–15%. Toto jsou nicméně obecné hodnoty dřevin (bez udání podmínek měření) a nikoli dřevních vláken, či dřevní moučky.

Tvrdost řepkových stonků není známa. Byl očekáván určitý vliv tohoto materiálu na tvrdost výsledného kompozitu, podle výsledků zkoušky se předpokládá, že tvrdost výsledného kompozitu snižuje. Kvůli odlišnému poměru jednotlivých složek však nelze tento WPC materiál relevantně porovnat s ostatními.

Odlišný poměr matrice/výztuha u řepkového WPC naznačuje, že nižší tvrdost výsledného kompozitu souvisí s vyšším obsahem polymerní matrice (jak naznačuje i Li (2011), viz kapitola o technologických vlastnostech WPC), nicméně není známa hodnota Brinellovy tvrdosti pro použitý PE. Pravděpodobně by byla charakterizována jinou stupnicí, neboť tvrdost polymerů se měří jinými metodami.

Podle srovnání vtisků vnikací kuličky u 3. (PE-dub) a 1. varianty (PE-řepka) na obrázku 11 si lze všimnout, že vtisky na klasickém WPC materiálu jsou více patrné, než na řepkové variantě. Lze tudíž konstatovat, že WPC plněné částicemi ze stonků řepky vykazuje vyšší pružnou deformaci než ostatní měřené materiály.

Výsledek analýzy rozptylu potvrzuje statisticky významný vliv materiálu na hodnotu tvrdosti. Vyšší variační koeficient u řepkového WPC naznačuje, že má tento materiál nižší homogenitu, než ostatní zkoumané materiály.



Obr. 11. Srovnání vtisků 3. a 1. varianty.

6.3 Přídržnost povrchu

Z výsledků zkoušky lze odvodit, že pro spojení vzorku s tělískem bylo zvoleno lepidlo s větší soudržností, nežli je soudržnost povrchu zkoumaných materiálů, neboť nedocházelo ke koheznímu porušení lepidla. Zároveň byla prokázána vyšší přilnavost lepidla k povrchu tělíska nežli k povrchu substrátu. Při měření docházelo pouze k poškození typu A a -/Y, tj. kohezními porušení v substrátu a adheznímu porušení mezi substrátem a lepidlem (viz obr. 12).



Obr. 12. Plocha lomu 5. varianty.

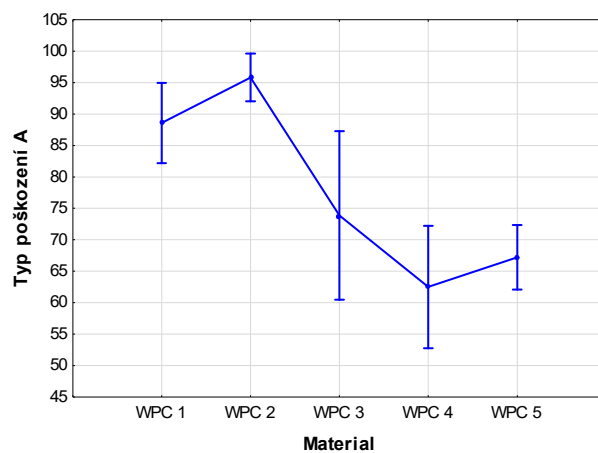
U WPC s řepkovým plnivem byl zaznamenán charakter lomu průměrně z 90 % porušený v substrátu. Druhá varianta WPC vykazovala o 5% vyšší porušení v substrátu, zatímco u ostatních variant byl výsledek podobný, a to přibližně ze dvou třetin povrchu porušený v substrátu. Tyto hodnoty je možné vysledovat v tabulce 16 a na obrázcích 13 a 14.

Hodnota tahové pevnosti byla u řepkového WPC nejnižší, a to průměrně 0,6 MPa. Ostatní materiály vykazovaly hodnoty okolo 1 MPa (viz tab. 16 a obr. 15).

Tab. 16. Průměrné hodnoty typu poškození a pevnosti v odtrhu.

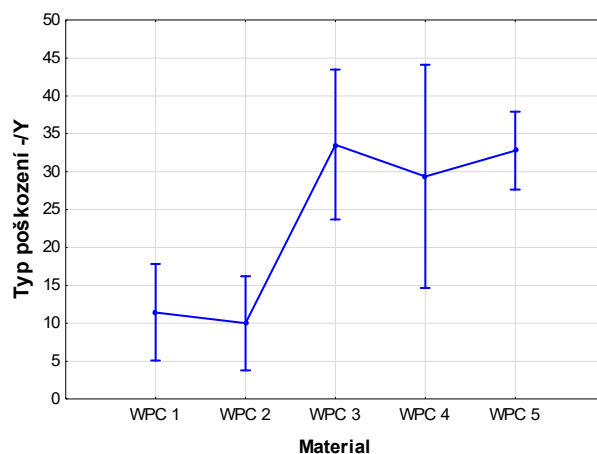
varianta	typ poškození A (%)	typ poškození -/Y (%)	pevnost (MPa)
1	89 (8)	11 (60)	0,6 (16)
2	96 (6)	10 (50)	0,9 (35)
3	74 (24)	34 (32)	1 (15)
4	63 (19)	29 (60)	1 (16)
5	67 (10)	33 (20)	1,2 (13)

Pozn. hodnoty uvedené v závorkách představují variační koeficienty v procentech.



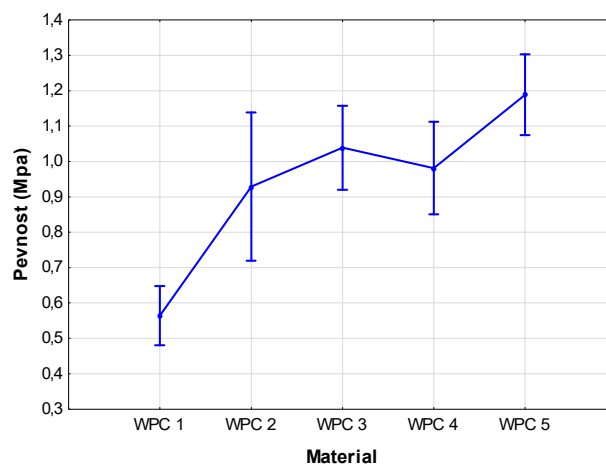
Obr. 13. Graf závislosti typu poškození A na materiálu.

Typ poškození A = kohezní porušení v substrátu



Obr. 14. Graf závislosti typu poškození -Y na materiálu.

Typ poškození -Y = adhezní porušení mezi substrátem a lepidlem



Obr. 15. Graf závislosti pevnosti v odtrhu na materiálu.

Nižší pevnost v odtrhu u řepkového WPC pravděpodobně částečně souvisí s adhezí polymerní složky kompozitu k použitému lepidlu, která je nižší než adheze lignocelulóзовých materiálů k lepidlu. Varianta 1 obsahuje vyšší podíl PE, než ostatní varianty, což se promítlo v nižší síle potřebné pro odtržení tělíska od jejího povrchu.

Podle typu poškození nelze určit, zda materiálové složení ovlivňuje charakter lomu. Podobnost výsledků 3., 4. a 5. varianty tomu naznačuje, avšak 3. a 4. varianta mají obě poměrně velké variační koeficienty v rámci typu porušení; 2. varianta se stejným materiálovým poměrem dub/PE se vymyká. Vysvětlením by mohl být odlišný charakter použitých aditiv.

Na povrchu lomu u řepkového WPC byly okem dobře patrné vytrhané částice stonků řepky, zatímco plastová matrice se jevila neporušená. U ostatních WPC materiálů tento jev nebyl takto dobře rozlišitelný z důvodu použitých barviv; materiály 2.–4. varianty jsou stejnoměrně probarveny v celém objemu. Nicméně předpokladem je zachování tohoto jevu i u variant WPC s dřevními vlákny z důvodu hydrofilie dřeva a tudíž i následné vyšší adheze této složky kompozitu k lepidlu. Srovnání ploch lomů je vidět na obrázku 16.



Obr. 16. Srovnání plochy lomu jednotlivých variant na odtržených tělískách.

7. Závěr

WPC materiály mají v dnešní době velký potenciál. V aplikacích substituce tradičních dřevěných materiálů z hlediska mechanických vlastností převyšují tradiční plasty. Klasické WPC materiály a WPC materiály s částicemi stonků řepky ozimé se jeví jako materiály se srovnatelnými mechanickými vlastnostmi.

Výsledky měření v této práci byly ovlivněny použitým odlišným poměrem složek řepkového WPC kompozitu vůči ostatním WPC materiálům, nicméně z hlediska některých zkoumaných vlastností nebyl tento vliv pozorován. Toto se týká především přidrženosti povrchu, u které nebyl tento jev patrný u plochy lomu. Pevnost v odtrhu na druhou stranu ovlivněna byla.

U hodnot tvrdosti podle Brinella je vliv poměru složek kompozitu prokazatelný jak z teoretického hlediska podle literární rešerše, tak z hlediska praktické části této práce: Statistické metody potvrdily vliv odlišnosti materiálu na tuto vlastnost. Lze tudíž předpokládat, že podíl na výsledné odlišné hodnotě tvrdosti u řepkového WPC měl jak odlišný poměr složek, tak použitá odlišná lignocelulózová složka. Přesto se tvrdost řepkového WPC od ostatních lišila pouze o jeden stupeň tvrdosti. Můžeme tudíž usuzovat, že je možné tyto materiály použít v popisovaných oblastech podlahovin a obkladů.

Odlišnost složení řepkového materiálu se nejvíce projevila ve zkoumaných ohybových charakteristikách. Vyšší pevnost v ohybu řepkového WPC dává dobrý předpoklad pro aplikaci v oblasti podlahovin a nenosných konstrukcí, nicméně nižší hodnota modulu pružnosti ukazuje, že má materiál nižší odpor proti pružné deformaci než klasické WPC materiály. Je otázkou, zda by při stejném poměru složek vykazoval řepkový kompozit podobné hodnoty, jako ostatní WPC.

Ve výsledku lze konstatovat, že je možné z hlediska zkoumaných mechanických vlastností nahradit v dřevoplastových kompozitech dřevní složku částicemi stonků řepky ozimé, nicméně by bylo vhodné provést další výzkumy zabývající se poměrovým složením tohoto kompozitu.

8. Seznam literatury

8.1 Tištěná literatura

ÅSTRÖM, B. T. *Manufacturing of polymer composites*. London: Chapman & Hall, 1997. ISBN 0412819600.

BLAHA, L. *Analýza typů plniva na vlastnosti dřevoplastového kompozitu*. Bakalářská práce. VUT v Brně, 2016.

BLEŠA, V. *Analýza technických parametrů a požadavků na WPC podlahoviny*. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně, 2011.

BÖHM, M., REISNER, J., BOMBA, J. *Materiály na bázi dřeva*. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012. ISBN 978-80-213-2251-6

CARUS, M., EDER, A., DAMMER, L., KORTE, H., SCHOLZ, L., ESSEL, R., BREITMAYER, E., BARTH, M. *WPC/NFS Market study 2014-10 (Update 2015-06). European and Global Markets 2012 and Future Trends in Automotive and Construction*. Nova Institut GmbH, 2015.

ČSN EN 310 (490147) : *Desky ze dřeva – Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu*. Český normalizační institut, 1995.

ČSN EN 311 (490159): *Desky ze dřeva – Přídržnost povrchu – Zkušební metoda*. Český normalizační institut, 2003.

ČSN EN 1534 (492124): *Dřevěné podlahoviny – Stanovení odolnosti proti vtisku – Metoda zkoušení*. Český normalizační institut, 2011.

ČSN EN 15534 (649330): *Kompozity na bázi dřeva a termoplastů (obvykle nazývané kompozity plast-dřevo (WPC) nebo kompozity s přírodními vlákny (NFC)) – Část 1: Zkušební metody pro charakterizaci směsí a výrobků*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

ČSN EN ISO 4624 (673077): *Nátěrové hmoty – Odthrhová zkouška přilnavosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.

ČSN EN ISO 6506-1: *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

DEFONSEKA, Chris. *Introduction to Polymeric Composites with Rice Hulls*. Smithers Rapra Technology, 2014. ISBN: 978-1-90903-079-4

EL-HAGGAR, SALAH M. a KAMEL, MOKHTAR A. *Wood Plastic Composites, Advances in Composite Materials – Analysis of Natural and Man-Made Materials*. Dr. Pavla Tesinova (Ed.), 2011. ISBN 978-953-307-449-8

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), 772-785, 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. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2018.

KLYOSOV, A.A. *Wood-plastic Composites*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2007. ISBN 9780470148914

LI, Yongfeng. *Wood-Polymer Composites, Advances in Composite Materials – Analysis of Natural and Man-Made Materials*. Dr. Pavla Tesinova (Ed.), 2011. ISBN: 978-953-307-449-8

OKSMAN NISKA K. a SAIN M. *Wood-polymer Composites*. Woodhead Publishing Ltd, 2008. ISBN 978-1-84569-272-8

ROWELL, Roger M. *Wood Composites. Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, s. 279-303, 2005. ISBN 08-493-1588-3

SCHUT, J. *For compounding, sheet & profile: Wood is good*. Plastic Technology, 1999.

THOMPSON, R. *The Materials Sourcebook for Design Professionals*. Thames & Hudson, 2016. ISBN 978-0-500-51854-0

YAM, K. L., GOGOI B. K., LAI C. C., SELKE S. E. *Composites from compounding wood fibers with recycled high density polyethylene*. Polymer Engineering and Science, 1990.

8.2 Internetové zdroje

Advance Plastic Recycling [online]. Advance Plastic Recycling, 2017 [cit. 2019-04-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.advancedplasticrecycling.com.au/>>

Cision: PR Newswire. *Wood Plastic Composite (WPC) Market to Gain From Enhanced Demand for Recyclable Material in Automobile Industry: Radiant Insights, Inc.* [online]. San Francisco: PRNewswire, 2018 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z WWW: <<https://www.prnewswire.com/news-releases/wood-plastic-composite-wpc-market-to-gain-from-enhanced-demand-for-recyclable-material-in-automobile-industry-radiant-insights-inc-676239663.html>>

DebaBohemia. *Tvrđost dřevin* [online]. DebaBohemia.cz, 2007 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.debaboheemia.cz/nabizime/drevene-podlahy-parkety-prkna-renovace/tvrđost-dřevin.htm>>

Duofuse. *Co je WPC* [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z WWW: <<https://duofuse.cz/informace/co-je-drevoplast-wpc/>>

ELUC: Elektronická učebnice. *Dynamické zkoušky* [online]. ELUC, 2018 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z WWW: <<https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1106>>

Evropská databanka. *WoodflourMill, a.s. Mlýn na dřevní moučku: Dřevní moučka – perspektivní surovina pro zpracovatelská průmyslová odvětví* [online]. 2019 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z WWW: <<https://www.edb.cz/clanek-14275-drevni-moucka-perspektivni-surovina-pro-zpracovatelska-prumyslova-odvetvi>>

Fiberon [online]. Fiberon, 2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z WWW: <<https://www.fiberondecking.com/>>

Fortum Circo. *Recyclates* [online]. Fortum [cit. 2019-02-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.circoplastics.com/en/recyclates/>>

Fortum. *Recycled plastics and products* [online]. Fortum, 2019 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z WWW: <<https://www.fortum.com/products-and-services/recycling-waste/welcome-waste-solutions/recycled-plastics-and-products>>

Hardy Smith. *Hardik Panchal* [online]. Hardy Smith [cit. 2019-02-24]. Dostupné z WWW: <<http://hardysmith.org/Founder.html>>

Jeluplast. *WPC for furniture* [online]. JELU-WERK, 2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z WWW: <<https://www.jeluplast.com/en/wpc/furniture/>>

Lunawood [online]. PROKOM R&S, 2017 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z WWW: <<https://www.thermowood-wpc.cz/>>

MatWeb: Material Property Data. *Compressive Strength Testing of Plastics* [online]. MatWeb [cit. 2019-03-26]. Dostupné z WWW: <<http://www.matweb.com/reference/compressivestrength.aspx>>

MojeTerasa.cz. *Co je to WPC* [online]. Centario, 2011 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.mojeterasa.cz/co-je-to-wpc>>

Nábytkářský informační systém. *Aglomerované materiály* [online]. Nábytkářský informační server, 2013 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.n-i-s.cz/cz/aglomerovane-materialy/page/190/>>

Nextwood: *WPC - dřevoplast* [online]. Nextwood.cz, 2019 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z WWW: <<https://www.nextwood.cz/>>

Perwood [online]. TerrainEco, 2019 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.perwood.cz/>>

Polymer Database. *High-Density Polyethylene (HDPE)* [online]. Polymerdatabase.com, 2016 [cit. 2019-03-26]. Dostupné z WWW: <<https://polymerdatabase.com/Commercial%20Polymers/HDPE.html>>

Rehau. *Kolekce RELAZZO* [online]. Rehau [cit. 2019-02-20]. Dostupné z WWW: <<https://www.rehau.com/cz-cs/investor/terasa-zahrada/kolekce-relazzo>>

SANDBERG, D, A KUTNAR a G MANTANIS. *Wood modification technologies – a review*. IForest - Biogeosciences and Forestry [online]. 2017, **10**(6), 895-908 [cit. 2019-03-31]. DOI: 10.3832/ifor2380-010. ISSN 19717458. Dostupné z WWW: <<http://www.sisef.it/iforest/?doi=ifor2380-010>>

ŞENOL, Süleyman a Mehmet BUDAKÇI. *MEKANİK ODUN MODİFİKASYON METOTLARI*. Mugla Journal of Science and Technology [online]. 2016, 2(2), 53-53 [cit. 2019-03-31]. DOI: 10.22531/muglajsci.283619. ISSN 2149-3596. Dostupné z WWW: <<http://dergipark.gov.tr/doi/10.22531/muglajsci.283619>>

Seven Trust. *Outdoor Furniture* [online]. Seven Trust [cit. 2019-02-24]. Dostupné z WWW: <<https://www.consorziobonificacixerri.it/outdoor-furniture.html>>

SKLÁDANKA, Jiří. Ústav výživy zvířat a pícninářství MZLU v Brně. *Řepka olejka: Brassica napus L. var. arvensis Lam.(Thell)* [online]. Ústav výživy zvířat a pícninářství, 2006 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z WWW: <https://web2.mendelu.cz/af_222_multitext/picniny/sklady.php?odkaz=repka.html>

Taber Industries. *Taber Abraser (Abrader)* [online]. Taber Industries, 2018 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z WWW: <<https://www.taberindustries.com/taber-rotary-abraser>>

Technický portál.cz. *Jak využívají recyklované WPC v Rakousku* [online]. Technický týdeník, 2016 [cit. 2019-02-20]. Dostupné z WWW: <https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/jak-vyuzivaji-recyklovane-wpc-v-rakousku_34989.html>

Wikipedia. *Tření* [online]. Wikipedia, 2019 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z WWW: <<https://cs.wikipedia.org/wiki/T%C5%99en%C3%AD>>

Woodplastic. *Vše co by vás mohlo zajímat o woodplastic* [online]. [cit. 2019-01-02]. Dostupné z WWW: <<https://www.woodplastic.cz/faq/>>

WPC-dřevoplast.cz. *Technický list systému WPC BET kompozit* [online]. BET System cz, 2019 [cit. 2019-02-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.wpc-drevoplast.cz/technicky-list-wpc-dlazdic>>

Přílohy

Seznam příloh

Příloha 1. Vzorky varianty WPC s řepkovými stonky pro ohybovou zkoušku (před zkouškou).

Příloha 2. Vzorky varianty WPC s řepkovými stonky pro ohybovou zkoušku (po zkoušce).

Příloha 3. Statistické hodnocení vlivu tvrdosti na parametry kvality

Příloha 4. Zajištění měřeného vzorku v tvrdoměru

Příloha 5. Porovnání vlivu materiálu na tvrdost pomocí Duncanova testu.

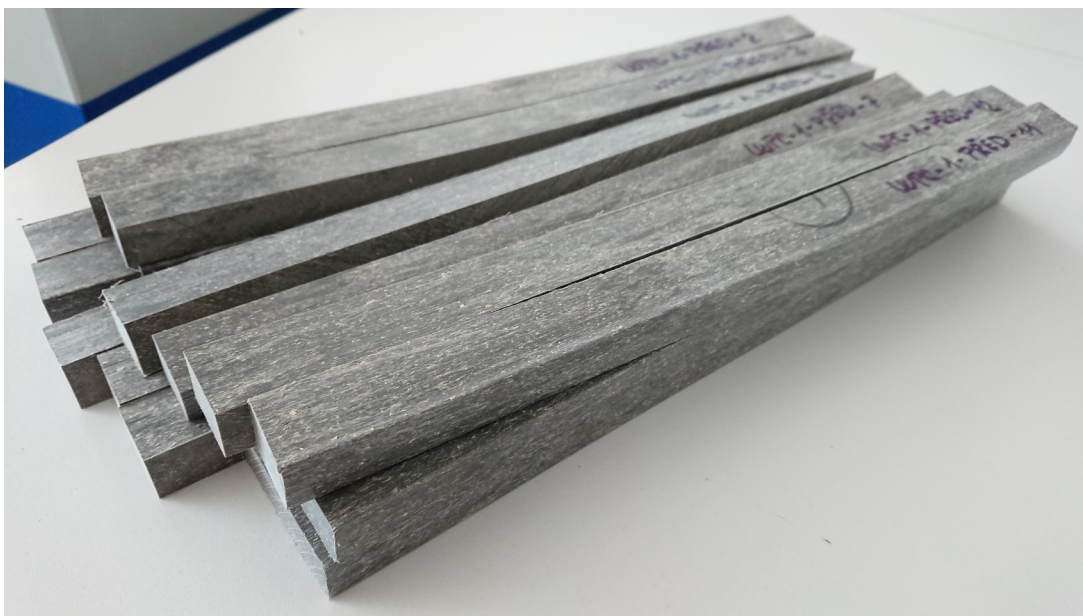
Příloha 6. Zdrsňené povrchy vzorků jednotlivých variant před zkouškou přídržnosti povrchu.

Příloha 7. Statistické hodnocení vlivu typů poškození A a -/Y a pevnosti v odtrhu.

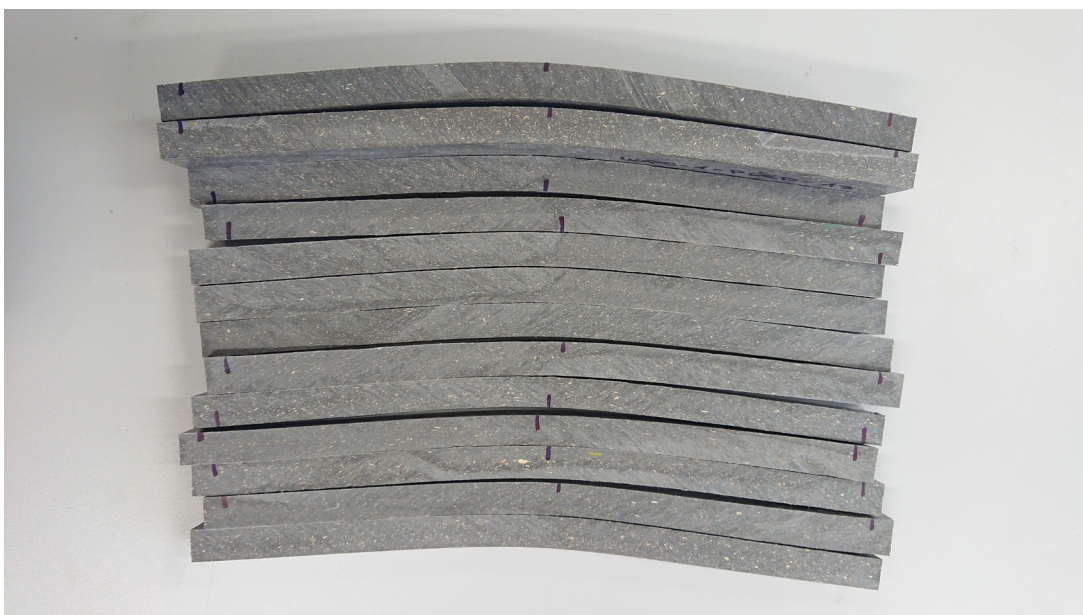
Příloha 8. Porovnání vlivu materiálu na typ poškození A pomocí Duncanova testu.

Příloha 9. Porovnání vlivu materiálu na typ poškození -/Y pomocí Duncanova testu.

Příloha 10. Porovnání vlivu materiálu na pevnost v odtrhu pomocí Duncanova testu.



**Příloha 1. Vzorčky varianty WPC s řepkovými stonky pro ohybovou zkoušku
(před zkouškou).**



**Příloha 2. Vzorčky varianty WPC s řepkovými stonky pro ohybovou zkoušku
(po zkoušce).**

Příloha 3. Statistické hodnocení vlivu tvrdosti na parametry kvality.

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F – Test	Hladina významnosti P
Tvrdost (MPa)					
Intercept	6279,295	1	6279,295	511527,4	***
Materiál	12,964	4	3,241	264,0	***
Chyba	1,166	95	0,012		

Příslušný model vysvětluje zhruba **100** % celkového součtu čtverců.

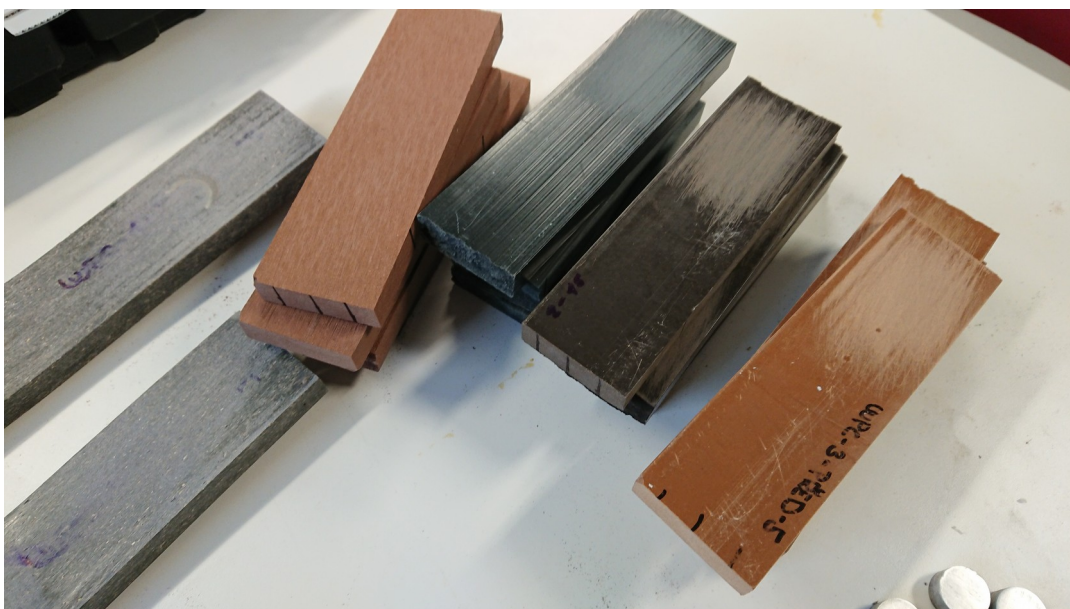
NS – statisticky nevýznamné, *** – statisticky významné, významnost byla přijata na hladině $P < 0.05$



Příloha 4. Zajištění měřeného vzorku v tvrdoměru.

Příloha 5. Porovnání vlivu materiálu na tvrdost pomocí Duncanova testu.

Tvrdost					
Materiál	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	7,20	8,07	8,11	8,10	8,13
1					
2	0,000				
3	0,000	0,351			
4	0,000	0,477	0,776		
5	0,000	0,149	0,550	0,409	



Příloha 6. Zdrsněné povrchy vzorků jednotlivých variant před zkouškou přídržnosti povrchu.

Příloha 7. Statistické hodnocení vlivu typů poškození A a -/Y a pevnosti v odtrhu.

Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fisherův F – Test	Hladina významnosti P
Typ poškození A					
Intercept	262561,9	1	262561,9	2375,145	***
Materiál	7698,2	4	1924,5	17,409	***
Chyba	4421,8	40	110,5		
Příslušný model vysvětluje zhruba 85,6 % celkového součtu čtverců.					
Typ poškození -/Y					
Intercept	19013,98	1	19013,98	163,7834	***
Materiál	3625,45	4	906,36	7,8073	***
Chyba	3598,86	31	116,09		***
Příslušný model vysvětluje zhruba 88,3 % celkového součtu čtverců.					
Pevnost (Mpa)					
Intercept	38,56441	1	38,56441	865,1925	***
Materiál	1,63778	4	0,40945	9,1859	***
Chyba	1,78293	40	0,04457		***
Příslušný model vysvětluje zhruba 100 % celkového součtu čtverců.					

NS – statisticky nevýznamné, *** – statisticky významné, významnost byla přijata na hladině $P < 0.05$

Příloha 8. Porovnání vlivu materiálu na typ poškození A pomocí Duncanova testu.

Typ poškození A					
Materiál	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	88,57	95,83	73,88	62,50	67,22
WPC 1		0,157	0,006	0,000	0,000
WPC 2	0,157		0,000	0,000	0,000
WPC 3	0,006	0,000		0,037	0,193
WPC 4	0,000	0,000	0,037		0,354
WPC 5	0,000	0,000	0,193	0,354	

Příloha 9. Porovnání vlivu materiálu na typ poškození -/Y pomocí Duncanova testu.

Typ poškození -/Y					
Materiál	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	11,429	10,00	33,57	29,37	32,78
WPC 1		0,807	0,001	0,004	0,001
WPC 2	0,807		0,001	0,003	0,001
WPC 3	0,001	0,001		0,501	0,892
WPC 4	0,004	0,003	0,501		0,561
WPC 5	0,001	0,001	0,892	0,561	

Příloha 10. Porovnání vlivu materiálu na pevnost v odtrhu pomocí Duncanova testu.

Pevnost (Mpa)					
Materiál	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	0,564	0,929	1,038	0,981	1,188
WPC 1		0,001	0,000	0,000	0,000
WPC 2	0,001		0,314	0,609	0,022
WPC 3	0,000	0,314		0,572	0,146
WPC 4	0,000	0,609	0,572		0,058
WPC 5	0,000	0,022	0,146	0,058	