



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

OPTIMALIZACE SLOŽENÍ
DŘEVOPLASTOVÝCH KOMPOZITŮ
S OHLEDEM NA JEJICH VYUŽITÍ
VE STAVEBNICTVÍ

THE OPTIMIZATION OF THE WOOD POLYMER COMPOSITE COMPOSITION
REGARDING ITS UTILIZATION IN BUILDING STRUCTURES

DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Anna Benešová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN VANĚREK, Ph.D.

1BRNO 2017

ABSTRAKT

Dřevoplastový kompozit je poměrně nový materiál kombinující rozmělněnou dřevní hmotu a termoplastový polymer. Tento materiál se využívá především jako alternativa masivního rostlého dřeva v oblasti exteriérových nenosných prvků, jelikož dosahuje přívětivějších vlastností z hlediska základní životnosti při minimálních požadavcích na údržbu. Surovinové složení i způsob zpracování kompozitu umožňují významně modifikovat vlastnosti konečného produktu dalšími látkami s pozitivním vlivem na některou z charakteristik kompozitu. Výzkum a vývoj v této oblasti se zaměřuje především na uplatnění takových modifikujících přísad a příměsí, které buď zvýší odolnost materiálu vůči povětrnostním vlivům, nebo umožní aplikaci druhotných surovin, jelikož významný podíl surovinové směsi je získáván z neobnovitelných zdrojů. Předkládaná disertační práce se zabývá posouzením vlivu modifikace dřevoplastového kompozitu separátně na dvou úrovních. První z nich je modifikace matrice recyklovaným polymerem, druhá modifikací plniva odpadní částicovou příměsí. U obou typů modifikace bylo provedeno stanovení primárních charakteristik spojených s hlavním způsobem aplikace a také předpokládané odolnosti nepříznivým podmínkám.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dřevoplastový kompozit, modifikace druhotnými surovinami, recyklovaný polymer, popílek, fyzikální a mechanické vlastnosti, odolnost vůči povětrnosti, požární odolnost, životnost

ABSTRACT

Wood-polymer composite is a relatively new type of material that combines shattered wood mass and a thermoplastic polymer. This material is utilized especially as an alternative to hard wood in the area of non-bearing exterior elements, as it reaches better properties in terms of the basic durability and low maintenance. Raw material composition and processing of the composite enable to provide a significant modification with further matters leading to an improvement of the end-product properties. Research and development in this field focuses predominantly on the utilization of such modifying additives that either enhance the resistance to weathering or are of the recycled nature, as a significant part of the raw material mixture comprises the constituent obtained from non-renewable resources. The aim of the thesis is the evaluation of the influence of the wood-polymer composite modification separately at two levels. First of them is the modification to matrix by using a recycled polymer, the second one comprises the modification of the wood flour with a secondary

spherical filler. Both types of modified composites have been assessed in terms of the prime characteristics and the resistance to adverse ambient.

KEYWORDS

Wood-polymer composite, modification with secondary raw materials, recycled polymer, fly ash, physical and mechanical properties, weathering, fire resistance, durability

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Ing. Anna Benešová *Optimalizace složení dřevoplastových kompozitů s ohledem na jejich využití ve stavebnictví*. Brno, 2017. 178 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Vaněrek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 8. 4. 2017

Ing. Anna Benešová

autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému školiteli Doc. Ing. Janu Vaněrkovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení v průběhu celého zpracování disertační práce, a také zaměstnancům Ústavu technologií stavebních hmot a dílců za ochotu a pomoc zejména při realizaci zkoušek experimentální části. Zároveň bych chtěla poděkovat zaměstnancům společnosti Polymer Institut Brno za možnost využití jejich zařízení při přípravě vzorků a paní Doc. Ing. Miroslavě Netopilové z VŠB-TUO za konzultace a kooperaci při zpracování části hodnotící požární odolnost.

Obsah

ÚVOD	10
TEORETICKÁ ČÁST	12
1 Dřevoplastové kompozity	12
1.1 Vyztužování plastů	12
1.2 Dřevoplastový kompozit, základní charakteristika.....	13
1.2.1 Matrice dřevoplastového kompozitu.....	14
1.2.2 Plnivo dřevoplastového kompozitu.....	17
1.2.3 Přísady a aditiva	20
1.3 Výroba dřevoplastového kompozitu.....	27
1.4 Vlastnosti a uplatnění dřevoplastového kompozitu, vliv přísad.....	29
1.4.1 Fyzikální vlastnosti	30
1.4.2 Mechanické vlastnosti, životnost	32
1.4.3 Dlouhodobá životnost, přirozený exteriér.....	34
1.4.4 Zrychlené testování životnosti	37
1.4.5 Uplatnění dřevoplastového kompozitu	44
2 Modifikace dřevoplastového kompozitu.....	46
2.1 Modifikace matrice	46
2.1.1 Mechanické vlastnosti a morfologie	47
2.1.2 Chemické složení matrice	56
2.1.3 Reologie a termické vlastnosti	58
2.1.4 Nasákavost, bobtnání a rozměrová stabilita.....	60
2.1.5 Vzhledové vlastnosti	62
2.1.6 Zatěžování nepříznivým prostředím	62
2.1.7 Modifikace matrice - shrnutí.....	69
2.2 Modifikace plniva	71
2.2.1 Použití poškozeného a odpadního dřeva.....	71
2.2.2 Použití odpadu ze zemědělství.....	73
2.2.3 Použití syntetického nebo anorganického vláknového plniva	74

2.2.4	Použití částicového anorganického plniva.....	80
2.2.5	Modifikace plniva – shrnutí	85
II.	Experimentální část	87
1	Cíl práce	87
2	Metodika prováděných zkoušek.....	89
2.1	Zkušební postupy pro fyzikální a fyzikálně mechanické vlastnosti	89
2.1.1	Stanovení nasákavosti zkušebních těles.....	89
2.1.2	Stanovení tahové pevnosti	90
2.1.3	Stanovení poměrného prodloužení.....	91
2.1.4	Stanovení modulu pružnosti v tahu.....	92
2.1.5	Stanovení ohybové pevnosti	92
2.2	Zkušební postupy pro stanovení chemické struktury a morfologie.....	93
2.2.1	Infračervená absorpční spektroskopie.....	94
2.2.2	Elektronová mikroskopická analýza	95
2.3	Zkušební postupy pro testy zrychleného stárnutí a požární odolnosti.....	95
2.3.1	Cyklické zatěžování vlhkostí, mrazem a vysoušením	95
2.3.2	UV ozařování	96
2.3.3	Požární odolnost.....	96
3	Metodika provedených prací.....	98
3.1	Etapa I – Příprava výzkumného záměru	98
3.2	Etapa II – Modifikace matrice	100
3.3	Etapa III – Modifikace plniva.....	101
3.4	Etapa IV – Závěrečné vyhodnocení.....	102
4	Výsledky experimentálních prací v rámci jednotlivých etap.....	103
4.1	Etapa I – Příprava výzkumného záměru	103
4.1.1	Rešerše dostupných surovin.....	103
4.1.2	Návrh receptur a výroba zkušebních těles	105
4.1.3	Metodika zkoušek	107
4.2	Etapa II – Modifikace matrice	108
4.2.1	Laboratorní zkoušení zkušebních těles v postprodukčním stavu.....	108

4.2.2	Zrychlené stárnutí a zkoušení degradovaných těles.....	115
4.3	Etapa III – Modifikace plniva.....	128
4.3.1	Laboratorní zkoušení zkušebních těles v postprodukčním stavu.....	129
4.3.2	Zrychlené stárnutí a zkoušení degradovaných těles.....	134
4.3.3	Požární odolnost.....	147
4.3.4	Vliv UV stabilizátoru.....	149
4.4	Etapa IV – Závěrečné vyhodnocení.....	150
4.4.1	Vyhodnocení modifikace matrice.....	151
4.4.2	Vyhodnocení modifikace plniva.....	152
5	Diskuze výsledků.....	154
6	Přínos práce.....	156
7	ZÁVĚR.....	157
	Použitá literatura.....	160
	Seznam obrázků.....	167
	Seznam tabulek.....	169
	Seznam grafů.....	171
	Seznam spektrogramů.....	176
	Použité zkratky.....	177
	Značky a jednotky.....	178

ÚVOD

Venkovní konstrukce a dílce jsou vystaveny degradující povětrnosti, která významně ovlivňuje jejich životnost a zvyšuje nároky na jejich údržbu. Konstrukční prvky a dílce z masivního a aglomerovaného dřeva představují skupinu stavebních materiálů nejvíce ohroženou působením vnějšího prostředí, jelikož jsou vysoce citlivé nejen ke slunečnímu záření a vlhkosti (a tedy implicitně i nízkým teplotám), ale jsou také kvůli svému chemickému složení tvořenému převážně cukry napadány různými biotickými škůdci, jako jsou plísňe, dřevokazné houby nebo hmyz. Z tohoto důvodu je nutné dřevěné konstrukce a materiály na bázi dřeva pravidelně ošetřovat vhodnými přípravky, což se výrazně projevuje na nákladech spojených s užíváním staveb.

Alternativou masivního a aglomerovaného dřeva ve venkovním použití jsou prvky a konstrukční dílce z dřevoplastového kompozitu. Tento progresivní materiál, v dnešní době již výrazně rozšířený a běžně dostupný ve formě obkladových dílců nebo terasových systémů, je vyráběn mísením termoplastové matrice a dřevěného plniva v takovém poměru, který odpovídá požadavku na dosažení optimálních vlastností obou těchto surovin po danou aplikaci. Termoplastová matrice bývá obvykle vylepšena příměsemi a přísadami, jejichž hlavním záměrem je chránit nejen vlákna plniva, ale také samotnou matici, před působením degradujících faktorů venkovního prostředí a současně zajišťují její tvarovou a vzhledovou stálost.

Pevnostní charakteristiky termoplastové matrice, které znemožňují její využití v neplněné formě pro konstrukční účely, jsou kompenzovány vláknovým charakterem plniva dodávajícím materiálu dostatečnou odolnost tahovému a ohybovému zatížení. Plnivo zároveň přispívá k vizuální a pocitové příbuznosti masivnímu dřevu, která je atraktivní s ohledem na pohledové části dílců a konstrukcí. Dřevoplastové kompozitní prvky se takto staly vhodnou a oblíbenou náhradou masivního dřeva s nízkými nároky na údržbu a optimálním vzhledem.

Obecnou snahou výzkumných a vývojových tendencí v oblasti stavebních materiálů i průmyslu jako takového, je využívání odpadních látek a recyklace zdrojů. Primární termoplasty jsou ve své podstatě ropné produkty, tudíž pocházejí z neobnovitelných zdrojů. Z tohoto důvodu bylo hlavním předmětem předkládané práce posouzení možností modifikace dřevoplastového kompozitu odpadními látkami, a to jak náhradou části matrice, tak dřevitého plniva. Příměsi obou hlavních složek kompozitu byly vybrány na základě teoretické rešerše odborných publikací a připravená zkušební tělesa byla v rámci základního výzkumu podrobena primárnímu testování fyzikálně mechanických vlastností a zkouškám trvanlivosti.

Praktická část práce řeší dva klíčové záměry. Prvním z nich je posouzení vlivu modifikace matrice dřevoplastového kompozitu odpadní polymerem, druhým pak modifikace plniva s ohledem na vybrané upravované vlastnosti. V rámci zkoušení obou typů modifikací byly realizovány destruktivní i nedestruktivní zkoušky pro vyhodnocení fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností připravených kompozitů. Následně pak byla posuzována odolnost modifikovaného WPC vůči vlivům degradujících faktorů, která měly posloužit jako podklad pro stanovení vývoje sledovaných vlastností v čase v běžné venkovní aplikaci. Výstupem provedeného výzkumu byla prvotní optimalizace surovinového složení obou typů modifikovaného kompozitu s ohledem na synergii všech sledovaných charakteristik.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Dřevoplastové kompozity

Dřevoplastový kompozit je relativně nový materiál, jež byl připraven primárně s cílem nahradit rychle degradující masivní dřevo výrazně náročné na údržbu při vystavení venkovním podmínkám. Základem kompozitu je spojení termoplastové matrice a dřevitého plniva, které jsou pro zvýšení odolnosti a životnosti doplňovány příměsemi a přísadami s požadovaným impaktem. Charakteristika materiálu a rešerše současných výzkumů v oblasti jeho výroby a modifikace jsou uvedeny v následujících kapitolách.

1.1 Vyztužování plastů

Polymerní materiály jsou uplatňovány ve svých aplikacích převážně jako vyztužené kompozity, a to jednak z důvodu snížení nákladů na jejich výrobu vzhledem k vysokým vstupním investicím do surovin a výrobního procesu při zachování požadovaných vlastností, jednak kvůli zlepšení konkrétních specifických parametrů. Tradičním plnivem termoplastů (a plastických materiálů obecně) je granulovaný uhličitán vápenatý. Vzhledem k výrazně negativnímu vlivu jeho výroby na životní prostředí jsou však kontinuálně vyvíjeny alternativní typy plniv směřující jak ke snižování nákladů výroby, tak ke zlepšování pevnosti a odolnosti plastů. [1], s. 3]

Plniva pro kompozity s polymerní matricí tvoří širokou skupinu organických i anorganických látek, které mohou mít formu prášku, vláken nebo textilie, vždy záleží na charakteru a zpracovatelnosti matrice, a také na vzájemné kompatibilitě s plnivem. Obecně jsou rozlišovány dvě skupiny zahrnující plniva anorganická a plniva organická. Do skupiny anorganických plniv se řadí různé sloučeniny zahrnující oxidy, kovy, již zmiňované uhličitany, fosfáty, sulfáty, a také minerály, nejčastěji talek, jíly, slídy, saze, grafit, perlit a další. Z organických sloučenin jsou jako plniva převážně užívány polystyren, pryž nebo rozmělněná dřevní hmota. [2], s. 1] Kromě zdrojů primárních plniv se v plastikářském průmyslu uplatňují také plniva sekundární (získaná recyklací odpadního materiálu).

Zmíněná anorganická a organická plniva jsou primárně částicového (sférického) charakteru. Vedle nich se uplatňují také fibrilární plniva, která v oblasti anorganické zastupují skelná, uhlíková nebo čedičová vlákna. Fibrilární plniva organického původu mohou být přírodní nebo syntetická. Přírodními plnivami jsou nejčastěji upravená dřevní nebo rostlinná vlákna. Syntetická plniva zahrnují polyamidová, aramidová nebo viskózová vlákna.

Vyztuřování plastů přináší z technologického hlediska mnoho výhod. Mezi přednosti vyztuřených plastů lze zařadit především snížení míry smršťování (rozměrová stálost), zvýšení odolnosti při zatížení nebo vlivem působení degrađačních faktorů, zvýšení odolnosti vůči vysokým teplotám, vlhkosti, žáru a chemické korozi, zlepšení teplotní stability, elektrických a tepelně-izolačních vlastností, propustnosti pro vlhkost a páry a další. [2], s. 1] Úprava konkrétní vlastnosti materiálu s polymerní bází je vždy závislá na specifickém typu plniva, které mu požadovanou charakteristiku v definované míře zprostředkuje. Výběr vhodného plniva se tedy notně odvíjí od předpokládané aplikace konečného plastového produktu.

1.2 Dřevoplastový kompozit, základní charakteristika

Termín *dřevoplastový kompozit* původně označoval rozsáhlou skupinu materiálů, jejichž základní charakteristikou bylo spojení plastové matrice (termoplastové nebo termosetové) s dřevní hmotnou v jakékoliv podobě (tedy desky, dýhy, pilin, moučky apod.). Výrobu dřevotermosetových kompozitů lze datovat již do začátku 20. století, jedním z nejznámějších materiálů tohoto typu je kompozit *bakelit* představující směs fenol-formaldehydového resinu a dřevité moučky. Materiály kombinující termosetovou matici a dřevo v rozmělněné formě (dřevní vlákna, dřevitá moučka) jsou v dnešní době spíše popisovány termínem *aglomerované dřevo* a termín *dřevoplastový kompozit* se ustálil pro materiál připravený z termoplastové matrice plněné dispergovanou dřevitou moučkou, vlákny nebo větší frakcí rozmělněného dřeva. [3], s. 365]

Příprava komerčně použitelného materiálu kombinujícího dispergované částice dřevní hmoty v termoplastové matici byla poprvé provedena v 80. letech. Jelikož představovala propojení dřevařského průmyslu běžně orientovaného na stavební prvky a plastikařského průmyslu uplatňujícího své produkty především ve strojírenství a aplikacích pro automobilový průmysl, byly prvními výrobky z tohoto materiálu okenní rámy. Původní typy dřevoplastového kompozitu byly založeny na kombinaci polypropylenu a později polyetylenu a dřevité moučky (resp. vláken) v obecném obsahu 50 %. [3], s. 366] Následně se škála dispergovaným dřevem plnitelných polymerů rozrostla o další typy zahrnující především PVC, polystyren, další polyolefiny, polyvinyl chlorid a kopolymery – polybuteny, polybutany, polyakryláty, butylkaučuk, kopolymer etylen/propylen, ABS a další. V současné době je celkový seznam typů matic použitelných pro přípravu dřevoplastového kompozitu velmi dlouhý, jelikož obsahuje kromě běžných termoplastů také jejich různé modifikace, sekundární polymery a směsné polymery. [4], s. 102]

Hlavním předpokladem pro uplatnění určitého typu termoplastové matrice je zajištění její kompatibility s plnivem. Zvyšování kompatibility mezi plnivem a matricí dřevoplastového kompozitu je realizováno dvěma způsoby, a to buď přidáním kompatibilizačního aditiva do struktury matrice (případně přizpůsobením její polaritě jiným vhodným nástrojem), nebo úpravou plniva prostřednictvím hydrofobizace. Z výzkumů vyplývá, že druh dřeva, z něž je plnivo připraveno, není pro jeho použití určující, mnohem větší vliv mají charakteristiky spojené s jeho zpracováním, zejména pak tvar a velikost částic dřeva, a také křivka zrnitosti v rámci celého objemu. Standardně se uplatňuje dřevní hmota zpracovaná na dřevitou moučku (částice o velikosti 0,01 – 1 mm), piliny (1 – 10 mm), třísky (10 – 20 mm) a částice pravidelného tvaru (vločkovité, vláknité apod.). [4], s. 102] Výběr a charakter složek dřevoplastového kompozitu je tedy určujícím faktorem pro jeho použití, jelikož předurčuje jeho konečné vlastnosti vzhledem k aplikačním předpokladům.

1.2.1 Matrice dřevoplastového kompozitu

Primárním požadavkem na použití termoplastu pro výrobu dřevoplastového kompozitu je jeho bod tání. Termoplasty jsou obecně zpracovávány zahřátím na teplotu tání, při níž jsou tvárné. Při výrobě dřevoplastového kompozitu představuje tedy hlavní omezení teplota rozkladu hemicelulózy, při níž degraduje chemická struktura plniva, a která se pohybuje blízko teploty 200°C. Bod tání termoplastu pro výrobu dřevoplastového kompozitu nesmí tuto hranici překročit. Z tohoto důvodu jsou optimálními typy polymerů použitelnými jako matrice dřevoplastového kompozitu polyetylen, polypropylen, polystyren a polyvinylchlorid. Kromě těchto běžně používaných polymerů byly dobré výsledky dosaženy také u nylonu 6 a PMMA v případě, že doba zpracování směsi byla maximálně zkrácena, a také u nylonu 12 s nižším bodem tání umožňujícího výrobu kompozitu s dobrou tahovou pevností při 60% plnění. [5], s. 205]

Největší objem komerčního dřevoplastového kompozitu je vyráběn s polyetylenovou matricí. Polyetylen je semikrystalický polymer s relativně nízkým bodem tání (pohybujícím se v rozmezí 106 – 130 °C v závislosti na hustotě nebo typu). Výhodou polyetylenové matrice je dobrá opracovatelnost, minimální nasákavost (pouze 0,02 % při 24hodinovém ponoření do vody) a dobrá odolnost chemickým látkám, poskytující pozitivní předpoklady pro ochranu dřevitého plniva. Polyetylenový granulát (surovina pro další zpracování) může být připraven v různých modifikacích lišících se zejména v molekulové hmotnosti, linearitě makromolekulových řetězců a přítomnosti různých nepravidelností, které ovlivňují zpravidla jeho hustotu. Na základě specifické hustoty je pak polyetylen klasifikován, jelikož

v konkrétních rozmezech hustoty vykazuje obdobné vlastnosti. Pro výrobu dřevoplastového kompozitu se nejčastěji používají vysokohustotní polyetyleny (HDPE), jenom výjimečně se uplatňují nízkohustotní (LDPE). [6], s. 51-56]

Poměrně menší podíl celkového komerčního objemu výroby tvoří dřevoplastový kompozit s polypropylenou maticí. Polypropylen se v porovnání s polyetylenem vyznačuje lepšími fyzikálně mechanickými vlastnostmi (na celém spektru jeho modifikací), zejména menší hmotností, vyššími pevnostmi a tuhostí, lepší odolností v krípu, menším provozním opotřebením a dobrou drsností povrchu (ta je důležitá zejména u podlahových dílců, jelikož omezuje klouzání). Významnou nevýhodou polypropyleny je však jeho křehkost (především při nízkých teplotách) a horší opracovatelnost vlivem tuhosti, která je problematická zejména při integraci spojovacích prvků. Kvůli chemické struktuře a přítomnosti terciárních vodíků mají polypropyleny v porovnání s polyetyleny tendenci více oxidovat a vyžadují tedy vylepšení větším množstvím antioxidantních přísad. [6], s. 57-58]

Základní chemická struktura polypropyleny není lineární, nýbrž kromě přímé makromolekuly obsahuje také větve bočních substituentů (metylové skupiny), které mohou být navázány v rovině nebo pod různými úhly vůči základnímu lineárnímu řetězci. Z tohoto důvodu lze u polypropyleny rozlišovat několik modifikací, a to ataktickou (s náhodně strukturovaným větvením substituentů), izotaktickou (se střídavě strukturovaným větvením substituentů) nebo syndiotaktickou (s lineárně strukturovaným větvením substituentů). Takto strukturovaný polypropylen je označován jako homopolymer. Skupinu polypropylenů pak doplňují kopolymery, které se od homopolymerů liší nejenom tvarem a vlastnostmi makromolekulových řetězců, ale také konečnými vlastnostmi plastu. [6], s. 57]

Polypropylenové homopolymery mají krystalický charakter s krátkou vzdáleností molekul a jejich bod tání se pohybuje v rozmezí 161 – 165 °C. Kopolymery polypropyleny obvykle obsahují naroubovaný etylenový komonomer a větví se do formy náhodného nebo blokového kopolymeru. Bod tání je u kopolymerů položen níže, pohybuje se v rozmezí 140 – 155 °C. Významný rozdíl ve vlastnostech homopolymerů a kopolymerů polypropyleny spočívá kromě v bodu tání také v pevnostních charakteristikách a v teplotě skelného přechodu, což je vlastnost definující především odolnost polymeru v nízkých teplotách (jedná se o teplotu, při níž polymer začíná křehnout). [6], s. 57-58] Zatímco homopolymery se vyznačují vyššími hodnotami pevností, kopolymery vykazují nižší teplotu skelného přechodu. Pro běžné aplikace zahrnující rovněž přípravu dřevoplastového kompozitu se využívá převážně homopolmer polypropyleny v ataktické formě. [6], s. 57]

U polystyrenu je dřevní plnivo využíváno zejména ke zlepšení fyzikálně mechanických vlastností. Příprava surovinové směsi pro dřevoplastový kompozit s polystyrenovou maticí je specifická vzhledem k výrazné inkompatibilitě matrice s charakterem plniva, které musí být vždy adekvátně modifikováno k dosažení požadovaného efektu. Je žádoucí, aby částice použitého plniva byly podlouhlé kvůli nutnosti opatřit je chemickou nebo termální povrchovou úpravou, která umožní naroubování kopolymeru. Dřevní moučka se v tomto případě modifikuje izokyanáty nebo alkoxysilany. [4], s. 106]

Dřevoplastové kompozity s polyvinylchloridovou maticí tvoří velmi malý podíl komerčního trhu s dřevoplastovými kompozity. Hlavní nevýhodou polyvinylchloridové matrice je nutnost využívat různých typů plastifikátorů k dosažení dobré adheze k částicím plniva, které však ovlivňují nejen zpracovatelnost, ale i výsledné vlastnosti kompozitu. [7], s. 363] Stejně jako polypropylenové i makromolekuly polyvinylchloridu se mohou vyznačovat různými modifikacemi uspořádání a řetězení, nejčastěji se vyskytuje v syndiotaktické a ataktické formě. Nemodifikovaný polyvinylchlorid má kvůli krystalické struktuře značně vysokou teplotu skelného přechodu (mezi 70 a 90 °C), je tedy velmi křehký. Z tohoto důvodu je pro běžné použití modifikován přísadami na plastifikovaný nebo flexibilní typ. [6], s. 60]

Kromě běžných syntetických termoplastů jsou v poslední době diskutovány také možnosti použití biopolymerů a biologicky rozložitelných termoplastů. Vhodného bodu tání dosahují např. polymer kyseliny mléčné (PLA), polymery skupiny PHA a polyhydroxybutyrát (PHB) vyznačující se podobnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi jako polypropylen, ovšem s mnohem horší rázovou houževnatostí vlivem krystalické struktury. Polymer kyseliny mléčné je navíc výrazně citlivý k vlhkosti a má tendenci hydrolyzovat. Z tohoto důvodu musí být zajištěno, aby surovinová směs kompozitu zůstávala po celou dobu zpracování suchá. [5], s. 206-207]

Dalším vhodným biodegradabilním materiálem pro dřevoplastové matrice je škrobový termoplast zejména díky dobré kompatibilitě s přírodním plnivem. Vlastnosti tohoto typu dřevoplastového kompozitu závisí především na plastifikaci škrobu amylopektinem a amylózou, vyhnětením s glycerolem, sorbitolem, vodou a dalšími plastifikátory. Plněním lignocelulóзовými vlákny bylo u tohoto termoplastu dosaženo zvýšení Youngova modulu. Vedle škrobového termoplastu lze pro výrobu dřevoplastového kompozitu použít také poly-ε-kaprolaktan, sukcinát polybutylenu nebo polybutylen adipát tereftalát. [5], s. 208-210]

1.2.2 Plnivo dřevoplastového kompozitu

Dřevní plnivo, které se užívá pro výrobu dřevoplastového kompozitu, má obvykle charakter částic nebo velmi krátkých vláken a tvoří zpravidla 50%, někdy však až 70% podíl. Vzhledem k běžným výrobním postupům se delší vlákna užívají pouze výjimečně. Dřevní masa zpracovávaná na plnivo dřevoplastového kompozitu může být jednodruhová (smrk, jedle, borovice, listnáče), lze však aplikovat také směsi rozmělněného odpadu z dřevařské výroby (vždy je ovšem nutné stanovit jejich vlastnosti). Použití lignocelulózového plniva jako výztuže termoplastového polymeru může být realizováno ve dvou formách. Jedná se o dřevitou moučku nebo přírodní vlákna. [8], s. 59]

Dřevitou moučku lze charakterizovat jako dřevní masu rozmělněnou na částice o velikosti umožňující průchod sítím 850 μm . Vyrábí se z odpadu zpracovatelské výroby a její kvalita se hodnotí na základě několika kritérií, kterými jsou především druh původní dřeviny resp. poměr mísení jednotlivých druhů dřevin, čistota a rozložení frakcí. Čistota dřevní moučky odpovídá míře přítomnosti zbytků kůry, nečistot a cizorodých látek. Vysoká hodnota těchto kvalitativních vlastností se dosahuje specifickými procesy uplatňovanými při zpracování dřevité moučky a promítá se do konečné jednotkové ceny plniva. [9], s. 269-270]

Výroba dřevité moučky není založená na standardizovaném technologickém postupu, obvykle se skládá z několika kroků tvořících obecný postup zpracování. Prvním krokem je rozdělení dřeva a klasifikace velikosti částic, pro redukci velikosti částic se při zpracování masivního dřeva užívají drtiče a štěpkovače. Poté se vzniklá hmota rozmělnuje mletím ve třecím nebo válcovém mlýnu. Rozmělněná a rozemletá dřevní masa obsahuje dřevní vlákna v maximálním poměru velikosti zrna 1-5. Tento aspekt je výhodný pro plnění plastů zejména z technologického hlediska (krátká vlákna nemají tendenci k blokaci), omezuje však schopnosti plniva polymer vyztužovat. [9], s. 270-271]

Klasifikace dřevité moučky se provádí po rozmělnění prostřednictvím vibračních, rotačních nebo oscilačních sítí. Většina komerčních výrobců užívá pro výrobu dřevoplastového kompozitu dřevitou moučku s velikostí částic v rozsahu 180 – 425 μm , což odpovídá rozptylu velikosti ok sítí standardizovaných pro USA 40-80 [9], s. 271], jiní autoři uvádí menší rozptyly, např. [7], s. 363] uvádí 60-40. Stejně jako [10], s. 81] dále specifikující tento rozptyl jako vhodný pro prvky vyráběné extruzí a rozptyl zbytku na síť 80 omezený sítím 100 pro injekční vstřikování. Jemnější dřevní moučka má několik technologických a vizuálních výhod, především více jednotný vzhled a hladší povrch produktů. [9], s. 271]

Vlastnosti dřevní moučky jsou dány anatomii dřeva, kterou lze charakterizovat jako pórovitou, vláknitou a anizotropní. Jednotlivé druhy dřevin se obecně klasifikují do dvou skupin – na měkké a tvrdé dřeviny. Anizotropie dřeva je výsledkem jeho vláknité anatomické struktury, kterou tvoří dlouhá dutá vřetenovitá vlákna, zvaná tracheidy. Dutý prostor po délce vláken – lumen – bývá zcela nebo částečně vyplněn různými polymerními sloučeninami (resiny, pryskyřice apod.) nebo vrůsty sousedních buněk, které tvoří dřevní tkáň. Obvyklá délka vláken činí u tvrdých dřevin 1 mm, u měkkých se pohybuje v rozmezí 3-8 mm. [9], s. 272]

Vzhledem k lepším předpokladům z hlediska vyztužování cílícího na zlepšení mechanických vlastností produktů byla provedena řada studií zabývajících se možnostmi plnění dřevoplastového kompozitu dřevní masou rozmělněnou na vlákna, tedy částice s vyšším indexem velikosti. Vyztužování dřevními vlákny přináší kompozitu lepší tahovou pevnost, protažení a rázovou houževnatost. Procesní zpracování surovinové směsi se však vyznačuje náročnějším způsobem homogenizace právě kvůli blokaci vláken při průchodu homogenizátorem. Dřevní vlákna pak mohou být nahrazena vlákny přírodními, nejčastěji rozmělněným lnem, konopím, jutou, kenafem, sisalem apod. [8], s. 59] Aplikace dřevních a přírodních vláken jako plniva dřevoplastového kompozitu se však vyznačuje řadou nevýhod. Mezi nejdůležitější patří tendence vláken agregovat v průběhu zpracování, nízká teplotní odolnost, a také nízká odolnost vůči vlhkosti a variabilita vlastností ovlivněná sezónními výkyvy podnebí. Jelikož dřevní masa (resp. vlákna) může tvořit až 65 či 70 % obj. celého kompozitu, je nezbytné ji modifikovat vhodnou úpravou zvyšující odolnost nežádoucím faktorům, ať už modifikací povrchovou nebo po celém objemu. [10], s. 81]

Modifikace dřevní hmoty pro plnění dřevoplastového kompozitu se obvykle provádí chemickou nebo fyzikální cestou, mezi nejčastější metody patří: [10], s. 81-83]

- **termální modifikace vláken** – využívaná zejména pro dosažení rozměrové stability vláken (odstranění přebytečné vlhkosti), zvýšení životnosti, vyvážení vlhkosti, úpravu permeability a zlepšení kvality povrchu. Termální modifikace dřevní hmoty je prováděna řadou procesních metod, které se liší podmínkami a technologií. Zpravidla zahrnuje několik kroků v suchém nebo mokřím procesu a spočívá především v expozici specifickému prostředí s ověřeným účinkem. Typicky se uplatňuje vystavení vysoké teplotě v rozmezí 120-250°C po dobu 15 min až 24 hodin v závislosti na druhu dřeviny, velikosti částic a konečné aplikaci upravené suroviny,

- **alkalická modifikace vláken** (mercerizace) – se obvykle uplatňuje na krátkých vláknech. Metoda se provádí zahřátím přibližně na 80°C v lázni 10% vodního roztoku NaOH, udržováním po dobu 3-4 hodin a následným promýváním a sušením. Plnivo je po tomto procesu méně náchylné k agregaci a vyznačuje se lepší smáčivostí povrchu,
- **acetylace vláken** – spočívá v ponoření hmoty do kyselin octové velmi nízké teploty přibližně na 1 hodinu a poté na několik minut do směsi anhydridu kyseliny octové a malého množství kyseliny sírové. Acetylovaná hmota musí být filtrována, promyta a následně vysušena. Proces stabilizuje buněčné stěny a snižuje tak tendenci plniva k navlhání,
- **modifikace kyselinou stearovou** – metoda se provádí pokapáváním dřevní hmoty roztokem kyseliny stearové v etylalkoholu. Objem roztoku je dávkován hmotnostně a tvoří až v 10% celkové hmotnosti upravované hmoty, která je následně sušena do rovnovážného stavu,
- **benzylace** – hmota je po ponoření do 10% roztoku NaOH, poté se 1 hod promíchává s benzoyl chloridem, následně se vlákna filtrují, promývají a suší. Po vysušení se na 1 hod ponoří do etanolu, poté jsou zkrápěna vodou, a dále vysušena v sušárně. Vlákna takto snižují svou hydrofilii,
- **modifikace toluen-diisokyanátem (TDI)** – hmota se máčí v chloroformu modifikovaném několika kapkami katalyzátoru (s dibutyl-dilurátovou bází) a poté je po přidavku toluen-2,4-diizokyanátu 2 hodiny intenzivně míchána. Vlákna se následně kropí acetonem a suší v sušárně,
- **modifikace peroxidem** – vlákna jsou po dobu půl hodiny ponořena do roztoku dikumyl nebo benzoyl peroxidu v acetonu, poté jsou scezena a vysušena. Tento proces významně ovlivňuje mechanické vlastnosti vláken,
- **anhydridová modifikace** – užívá anhydrid kyseliny maleinové PP (příp. PE) maleátovaný v roztoku toluenu nebo xylynu, do něž jsou vlákna ponořena k impregnaci a aktivaci hydroxylových skupin na povrchu. Tímto procesem by mělo být dosaženo snížení nasákavosti,
- **modifikace manganistanem** – vlákna se máčí v roztoku KMnO_4 v acetonu, poté se scedí a vysuší. Proces by měl snižovat hydrofilnost vláken,
- **silanová modifikace** – vlákna se máčí v roztoku alkoholu a vody (v poměru 3:2) obsahujícím aktivátor na silanové bázi po 2 hodiny při pH přibližně 4. Poté jsou

kropena vodou a sušena v sušárně. Reakcí s hydroxylovými skupinami by mělo dojít ke zlepšení kvality povrchu vláken,

- **modifikace izokyanátem** – izokyanátová skupina reaguje s hydroxidovými skupinami na povrchu vláken, čímž se zvyšuje přilnavost matrice k vláknu. Proces modifikace obvykle spočívá v kontinuálním působení izokyanátových sloučenin o teplotě přibližně 50 °C na vlákna po dobu 1 hodiny,
- **modifikace plasmovými výboji** – plasmové výboje působí na polaritu povrchu vláken. Vzhledem k heterogenním chemickým a morfologickým vlastnostem povrchu vláken však nelze jednoznačně definovat procesní parametry modifikace.

Modifikací přírodních vláken se dosahuje lepší kompatibility na jejich styku s matricí, která obvykle způsobuje nerovnoměrné rozptýlení plniva ve struktuře kompozitu. Heterogenita kompozitu je pak důvodem nižších hodnot jeho fyzikálně mechanických vlastností. Většina polymerů, zejména termoplastů, je nepolární (hydrofobní), a není tudíž kompatibilní s polárními dřevními vlákny, která jsou výrazně hydrofilní a obvykle obsahují vysoký podíl vody. Kromě vlastní modifikace povrchu vláken, která tuto polaritu upravuje, je homogenita dřevoplastového kompozitu dále vylepšována přísadami. Jejich charakteristika je předmětem další podkapitoly.

1.2.3 Přísady a aditiva

Obdobně jako neplněné plasty, i dřevoplastové kompozity je kvůli ochrannému požadavku matrice nutné vylepšovat přísadami, které mají pozitivní vliv na vlastnosti polymeru, zejména vzhledem k převážné aplikaci v exteriéru. Aditiva pro dřevoplastové kompozity plní obvykle jednu ze dvou základních funkcí. Jedná se buď o zlepšení zpracovatelnosti surovinové směsi a tím i fyzikálně mechanických vlastností výsledného produktu, nebo o funkci ochrannou. Do první kategorie, tedy mezi aditiva plnící funkci zlepšení vlastností na úrovni zpracování surovinové směsi, se řadí dva hlavní typy – kompatibilizéry a lubrikanty zahrnující také přísady pro řízení reologie taveniny. [11], s. 26]

Kompatibilizéry jsou chemické sloučeniny ovlivňující právě přilnavost povrchu vláken plniva k termoplastové matrici. Obvykle se jedná o polymery, jejichž působením dochází k rozvoji jedné z forem provázání povrchů obou hlavních složek kompozitu. Základní princip kompatibilizace spočívá v navázání přechodové fáze (kompatibilizéru) na hydrofilní dřevní vlákna a současném smáčení polymerní matrice při míchání. [10], s. 83]

Kompatibilizéry představují jednu z klíčových oblastí výzkumu dřevoplastového kompozitu, zejména vzhledem k nutnosti dosáhnout vhodného procesu navázání na obě

hlavní složky kompozitu. Problémy v tomto případě představuje především teplota tání substance (kompatibilizéru), která je důležitá pro správné provedení navázání. Pokud je teplota tání kompatibilizéru vyšší, než teplota tání polymerní matrice, nedochází k dostatečnému obalení vláken plniva a proces kompatibilizace je neúčinný. [1], s. 28-39]

Nejčastěji je jako kompatibilizéru pro výrobu dřevoplastového kompozitu s polyolefinovou matricí používáno maleátového polyolefinu vyráběného naroubováním anhydridu kyseliny maleinové na řetězce polymeru. Molekuly anhydridu se v tomto případě vážou na hydrofilní dřevní plnivo a polymerní složka se rouboje na makromolekuly matrice, čímž dochází ke vzniku mezifáze umožňující zvýšení homogenity taveniny. [11], s. 29-30] Pro dřevoplastové kompozity se v tomto směru uplatňují především kompatibilizéry připravené naroubováním anhydridu kyseliny maleinové na řetězce polyetyleny nebo polypropylenu, tzn. PE-g-MAH nebo PP-g-MAH. [13], s. 148] Podíl anhydridových funkčních skupin na celkové hmotnosti kompatibilizéru tvoří 1-6 %hm. U tohoto typu kompatibilizéru je nutné vždy dbát na vhodné skladování, jelikož kovalentní skupiny mohou reagovat se vzdušnou vlhkostí, čímž se snižuje jejich vazebný účinek. Do dřevoplastového kompozitu je přidáván ve množství 1-5 %hm. [6], s. 165]

Dalším typem kompatibilizéru jsou sloučeniny na bázi akrylátů. Obvykle se uplatňují dva typy kompatibilizérů s dlouhou tradicí aplikace – glycidyl metakrylát (GMA) a hydroxy metyl metakrylát (HEMA), které se komerčně distribuují jak terpolymery. Efektivita těchto kompatibilizérů může být dále zvýšena smícháním s anhydridem kyseliny maleinové. [1], s. 28-39]

Větší skupinu kompatibilizérů tvoří také silany a organosilany, které se však uplatňují převážně při plnění polymerů minerálními materiály. Modifikace povrchu plniva silanovými sloučeninami se osvědčila především pro skelná vlákna, při použití pro hydrofilní přírodní vlákna se uplatňuje směs hydrofilních a hydrofobních silanů (např. fenyl-tři-metoxysilan), které jsou reaktivní s oběma složkami kompozitu. Silanový kompatibilizér snižuje počet hydroxylových skupin surovinové směsi a zvyšuje stupeň síťování mezi vlákny a matricí, čímž je dosaženo zvýšení houževnatosti, mechanických vlastností a tepelné odolnosti. Obvykle se používají následující typy silanových kompatibilizérů: AEPTES, ATEPTMES, APTES a APTMES [14], s. 146, 400 a 497]. Funkční skupiny naroubované na organosilanech mohou být různého charakteru, v komerční výrobě se uplatňují γ -metakryloxypropyltrimetoxysilan, vinylové, epoxidové, aminové nebo alkylové silany.

Standardně se přídavek (organo)silanového kompatibilizéru pohybuje v rozmezí 3-10 %hm. [6], s. 172]

Zástupci skupiny kompatibilizéru na bázi chlorotriazinů a jejich deriváty jsou především látky AACA, OACA, kyselina metakrylátová nebo MAA-CAAPE. Hlavní výhodou použití těchto kompatibilizérů je jejich vedlejší fotostabilizační účinek. Toho je využíváno zejména při zpracování dřevoplastového kompozitu s polyetylenovou maticí, který výrazně podléhá degradačním účinkům slunečního záření, a zároveň poskytuje nízkou ochranu vláknům plniva, jež mají tendenci vlivem působení radiace blednout. Při styku se dřevem se na jeho povrch z chlorotriazinových komatibilizerů navazují skupiny ochranné aminové fotostabilizátory (hindered amine light stabilizers – HALS). [1], s. 28-39]

Z amidových a imidových kompatibilizérů je nejčastěji uplatňován BMI (N, N'-m-fenylbismaleimid). Tento kompatibilizér je výhodný v případě, že má plnivo vysoký obsah celulózy. Z tohoto důvodu je také uplatňován zejména pro celulózové whiskery a vlákna. U polypropylenu lze BMI použít také pro přímou modifikaci matrice, a to na principu efektu substituce elektronů. Proces modifikace spočívá v mletí polypropylenu s 5 % m-fenyl bismaleidu a 3 % peroxyesteru katalyzovaného 3 hodiny při 135 °C acetonem v dusíkové nebo argonové atmosféře. Modifikovaný polymer má výrazně odlišné vazebné vlastnosti než nemodifikovaný typ. [1], s. 30-31] Kromě jmenovaných typů se dále uplatňují kompatibilizéry s epoxidovou a izokyanátovou bází, nebo další polymerní a kopolymerní sloučeniny.

Lubrikanty slouží k úpravě reologie taveniny, tedy ovlivňují tečení taveniny surovinové směsi při jejím zpracování. Tok taveniny při konkrétní teplotě ovlivňuje kvalitu a homogenitu kompozitního materiálu po jeho vytvrzení včetně povrchových vlastností. Kromě termínu lubrikanty se pro tento typ aditiva užívá běžného názvu vosk nebo plastifikační přísada. Lubrikanty mohou mít dvě formy: [11], s. 26]

- interní (vnitřní) lubrikanty – ovlivňující viskozitu taveniny a tokové charakteristiky, které jsou obvykle kompatibilní s resinem taveniny,
- externí (vnější) – ovlivňující kluznost a lepivost taveniny, jelikož nejsou zpravidla kompatibilní s resinem taveniny. Při homogenizaci a dalším zpracování se ze směsi odlučují a migrují k povrchu taveniny, čímž vytváří separační vrstvu mezi materiálem a součástmi výrobního zařízení nebo formy.

Lubrikanty jsou chemické sloučeniny na bázi minerálních nebo syntetických olejů. Skupiny založené na minerálních olejích tvoří přírodní triglyceridy, přičemž mastné kyseliny

a alkoholy extrahované z triglyceridů jsou do formy lubrikantu dále zmýdelňovány, esterifikovány nebo upraveny jinou chemickou reakcí. Lubrikanty na bázi ropných derivátů (syntetických olejů) nejčastěji zastupují parafíny, mikrokrystalické vosky nebo polymerní vosky. [11], s. 26-27]

Volba a dávkování lubrikantu závisí na komplexním systému složení kompozitu. Standardně se lubrikanty dávkují v pevném nebo kapalném skupenství s ohledem na způsob dávkování ostatních aditiv při homogenizaci směsi. Jejich chemické složení se vždy odvozuje od základního systému polymer / plnivo. Pro polyolefiny se nejčastěji užívá lubrikantů na bázi kovových stearátů, amidů a esterů. Kovové stearáty se uplatňují jako externí lubrikanty, nejčastěji bývá aplikován zinkový stearát. [11], s. 26-27]

Pro úpravu reologie se do surovinové směsi dávkují amidové lubrikanty, a to zejména bis-amidy. Nejčastěji využívaným typem je EBS – etylen-bis-stearamid. Lubrikanty na bázi esterů jsou obvykle esterifikované polyoly karboxylové kyseliny. U PVC se vzhledem k odlišným požadavkům na proces lubrikace používají parafíny a funkční deriváty syntetických vosků. V komerční výrobě se nejčastěji aplikují vápenný stearát, EBS a parafin v závislosti na typu výrobního procesu. Běžný podíl aditiva tvoří u všech polymerů 0,5 %hm. [11], s. 26-27]

Druhou skupinu aditiv tvoří přísady vylepšující konečné vlastnosti kompozitu. Tyto mohou být zaměřeny na kompenzaci (eliminaci) jedné nebo více vlastností polymerní matrice či plniva, která má obvykle negativní vliv na provozní vlastnosti kompozitu. Aditiva zlepšující provozní vlastnosti tak mohou plnit kombinovanou kompenzační funkci. Typologie těchto aditiv lze kategorizovat následujícím způsobem: [11], s. 31-40]

- **stabilizátory** – stabilizační přísady bývají navrženy tak, aby zachovávaly co nejdéle specifické vlastnosti kompozitu a maximálně tak prodlužovaly jeho životnost. Do skupiny stabilizátorů se dále řadí: [11], s. 31-33]
 - antioxidanty – jedná se o látky zpomalující degradaci polymerní matrice vlivem zvýšených teplot a narušování povrchových vrstev působením CO₂ (způsobující vznik tzv. VOC – těkavých organických sloučenin). [8], s. 61] Jejich účinek spočívá v přerušování řetězců vznikajících oxidací polymeru. V tomto směru působí antioxidanty ve dvou rovinách, jako látky zabráňující degradaci termoplastu během zpracování (degradace vlivem zvýšené teploty při tavení) – primární antioxidanty – a sloučeniny zajišťující odolnost vůči působení okolní teploty v provozních podmínkách – sekundární antioxidanty.

Teplotní degradace polymerů začíná obvykle pomalu, výjimku v tomto případě tvoří PVC, které se naopak vlivem teploty rozkládá velmi rychle. Z tohoto důvodu se pro PVC vyvíjí a uplatňují tzv. tepelné stabilizátory, o nichž bude pojednáno separátně. Antioxidanty pro polyolefiny jsou založeny na fenolové, fosfátové nebo thioesterové bázi. [11], s. 31] Primární antioxidanty zahrnují především fenolové antioxidanty, aromatické amidy, fosfidy a alkylové sulfidy. Poslední dva jmenované typy se však obvykle kombinují s prvními dvěma uvedenými, jelikož při reakcích, které brání v termoplastu vzniku oxidovaných řetězců, sami takové řetězce ze své struktury vytváří. Jako sekundární antioxidanty se uplatňují sloučeniny se stejnými funkčními skupinami, ovšem s vyšší molární hmotností a nižší vznětlivostí, [15], s. 112]

- světelné stabilizátory – do této skupiny se řadí dva dílčí typy – UV stabilizátory a fotostabilizátory. Degradace polymerní matrice při vystavení podmínkám v exteriéru je zapříčiněná synergickým působením teploty, vlhkosti a iradiace. Vlivem těchto podmínek dochází ke změně barevnosti a jakosti povrchu kompozitu a urychluje se proces stárnutí, který může mít dále negativní účinky na jeho pevnostní charakteristiky. Ke zpomalení tohoto procesu se do surovinové směsi dávají různé typy přísad včetně modifikovaných pigmentů. UV stabilizátory fungují na dvou principech, a to na principu blokace UV záření nebo na principu jeho absorpce. UV stabilizátory blokující záření mají obvykle formu příměsí z vysoce krycích nebo neprůhledných látek, jako jsou oxid zinečnatý, oxid titaničitý, gumárenské saze nebo modifikované pigmenty. UV stabilizátory absorbující záření jsou obvykle založeny na bázi benzofenonů nebo benzotriazonů. Samotné působení UV záření má negativní vliv spíše na strukturu matrice, u kompozitu je však nutné také omezovat další působení vlhkosti, která je výrazným způsobem absorbována plnivem. Tento jev je označován jako fotodegradativní efekt. Spolupůsobení obou faktorů lze zpomalit kombinací UV stabilizátorů s fotostabilizátory. Nejčastěji užívaný fotostabilizátor je již zmiňovaný HALS, který lze rovněž uplatnit jako kompatibilizér surovinové směsi. Omezení degradace může být posíleno provedením povrchové úpravy

- konečného produktu obsahujícím UV blokující materiály, [11], s. 32; [16], s. 100-101]
- tepelné stabilizátory pro PVC – vzhledem k vysoké náchylnosti PVC k tepelné degradaci během zpracování i následného vystavení nepříznivým podmínkám v exteriéru je nutné vylepšovat surovinovou směs speciálními zpomalovači, které zabraňují uvolňování chloru. Tepelné stabilizátory obsahují obvykle kovový iont a organické ligandy, v současné komerční produkci se uplatňují především vápenno-zinečnaté sloučeniny, epoxidované oleje a resiny nebo syntetické zeolity, které vážou chlorové ionty během degradačního procesu, [11], s. 36]
 - **biocidy** – představují skupinu aditiv změřenou na ochranu přírodního plniva náchylného k podléhání škůdcům, především dřevokazným a dřevozbarvujícím houbám, plísním a dřevokaznému hmyzu. Signifikantní vliv na tuto skutečnost má chemická struktura dřeva složená z cukrů (celulóza, hemicelulózy), které jsou přirozenou potravou škůdců. Odolnost vůči škůdcům je primárně podpořena vhodnou volbou kompatibilizéru, který by měl zajistit omezení vniku vlhkosti do vnitřní struktury kompozitu, která může být jednak příčinou bobtnání plniva vedoucího k rozvoji vnitřního napětí v důsledku zvětšenému objemu vláken a posléze i mrazu, jednak zdrojem biotických degradačních faktorů. Odolnost houbám, plísním a hmyzu se u dřevoplastového kompozitu (obdobně jako u masivního dřeva) zvyšuje přidáním sloučenin bóru – boritanu zinečnatého, kyseliny borité, nebo tetrahydrátu oktaboritanu sodného. Aplikaci fungicidů a insekticidů lze provést standardní impregnací máčením nebo vakuovou impregnací před vlastním zahájením homogenizace surovinové směsi, v běžné komerční výrobě se však aditivum přidává ve formě prášku, [10], s. 86]
 - **retardéry hoření** – obě hlavní složky dřevoplastového kompozitu se vyznačují vysokou vznětlivostí, z tohoto důvodu je nutné modifikovat surovinovou směs vhodnými látkami, které ovlivní chování kompozitu při přímém vystavení ohni a žáru při aplikacích v interiéru i exteriéru. Nejčastěji užívanými retardéry hoření jsou anorganické sloučeniny halogenidů nebo fosforu. Zástupci halogenových sloučenin jsou v tomto případě sloučeniny brómu s vysokou účinností. Princip zhasnutí u bromových retardérů hoření spočívá v uvolňování těžkých plynů, které zamezují přísunu kyslíku k materiálu, a tím brání rozvoji požáru. Příkladem retardéru hoření

založeném na sloučeninách brómu je polybromovaný oxid, jehož použití bylo však kvůli ověřené toxicitě plynů legislativně výrazně omezeno. Velmi rozšířenou skupinou halogenových retardérů hoření jsou tzv. intumescentní retardéry hoření, které jsou více přívětivé k životnímu prostředí. Intumescentní retardéry hoření jsou obvykle složeny ze tří chemických látek – zdrojové kyseliny, karbonizačního činidla (zajišťujícího zuhelnění) a nadouvadla. Princip zhášení u těchto retardérů hoření spočívá ve vytvoření nepropustné zuhelnělé vrstvy na povrchu materiálu, která omezuje přísun kyslíku a zabraňuje tak dalšímu rozvoji požáru. Převážná většina intumescentních retardérů hoření je založená na polyfosforečnanu amonném (zdroj kyseliny), melaminu (nadouvadlo) a pentaerythritolu (karbonizační činidlo), [17], s. 73] V současnosti se v komerční výrobě dřevoplastového kompozitu používá několik specifických typů retardérů hoření. Jedná se o polyfosforečnan amonný s expandujícím grafitem, již zmiňovaný polybromovaný oxid, hydroxid hořečnatý, melaminový polyfosforečnan, hydroxid hlinitý a některé sloučeniny brómu (nejčastěji bromičnan zinečnatý), [10], s. 87]

- **aditiva zlepšující vzhledové charakteristiky** – tato aditiva se dělí do dvou kategorií, a to na látky zlepšující povrchové vlastnosti kompozitu a látky ovlivňující jeho estetický charakter jako celek. Lepších povrchových vlastností kompozitu je obvykle dosahováno prostřednictvím lubrikantů, které působí na reologii a odformování kompozitu a zlepšují tak kvalitu provedení jeho povrchu. Do této skupiny je možné zařadit také přípravky využívané na poprodukční úpravu povrchu (nátěry apod.). Druhou skupinu, tedy látky modifikující kompozit jako celek, zastupují především barviva a pigmenty, jež jsou určeny převážně pro úpravu vlastností termoplastové matrice. Tato aditiva lze dále kategorizovat zejména v návaznosti na jejich chemické složení, a to na: [18], s. 579-580]

- anorganické a minerální pigmenty – jedná se zpravidla o oxidy a soli kovů, které se vyznačují dobrou světelnou, termální a povětrnostní stabilitou. Přítomnost těchto pigmentů dávkovaných do směsi v množství 1-2 % může sice způsobit snížení hodnot mechanických vlastností, pro vystavení kompozitu v exteriéru je však jejich aplikace doporučována. Anorganické pigmenty se rozlišují podle barevnosti. Kromě oxidů kovu se často jako pigmentu využívají gumárenské saze (pro barvení na černo), které rovněž

slouží jako UV stabilizátor kompozitu. Kromě gumárenských sazí lze použít také sulfid antimonitý, který má rovněž účinky retardéru hoření,

- organické pigmenty a barviva – se vyznačují o stupeň nižší stabilitou než barviva anorganická a minerální. Jedná se o různé azinové sloučeniny a cyklické organické sloučeniny nesoucí požadovanou barevnost,
- barviva a pigmenty se speciálními efekty – jsou využívána spíše pro polymerní materiály, dřevoplastové kompozity se jimi modifikují zřídka. Jedná se o aditiva s fluorescenčním nebo perleťovým efektem, aditiva z kovových vloček, fotochromatické nebo termochromatické pigmenty a další,
- **aditiva snižující hustotu** – jsou určeny k vylehčování kompozitu, které může být realizováno přidáním nadouvadla, jež je však kvůli řízení reakcí a distribuci dalších aditiv (např. pigmentů) velmi náročné. Aplikace nadouvadla výrazně snižuje homogenitu kompozitu. Dalším typem aditiva snižujícího hustotu kompozitu jsou vylehčující příměsi. Ty mohou být zastoupeny např. dutými mikrosférami.

Kromě aditiv lze strukturu dřevoplastového kompozitu vylepšovat také přidáním příměsí. Ty mají obvykle charakter lignocelulózových vláken nebo anorganických filerů. Kromě upravené buničiny, která má vliv nejen na mechanické, ale i akustické vlastnosti kompozitu, lze surovinovou směs, a implicitně i konečný produkt, plnit skelnými vlákny s obdobným efektem. Z anorganických filerů se vedle vylehčujících mikrosfér užívají např. uhličitán vápenatý nebo nanojíl, které významně ovlivňují plošnou hmotnost a tuhost kompozitu. Vedle jmenovaných lze dále aplikovat talek, kaolin, slídu, wollastonit, dolomit, siliku, grafit nebo další typy vláken (uhlíková, aramidová apod.). [10], s. 79] Problematika plnění dřevoplastového kompozitu anorganickými plnivy je podrobněji rozebrána v kap. 2.2, která se zabývá způsoby modifikace plniva dřevoplastového kompozitu různými typy příměsí.

1.3 Výroba dřevoplastového kompozitu

Dřevoplastový kompozit je zpracováván prostřednictvím standardního zařízení pro zpracování plastů, ačkoliv proces výroby se během let modifikoval k dosažení maximální kvality produktů. Prvním krokem ve výrobě je vždy příprava suroviny. Vzhledem k náchylnosti dřevitého plniva k absorpci vzdušné vlhkosti a vody, jejíž přítomnost by při procesech spojených se zpracováním mohla vést ke zvýšení heterogenity produktů, bývají surovinové složky před zahájením výroby sušeny do minimální vlhkosti. [13], s. 2-148-149]

Proces zpracování dřevoplastového kompozitu na konečný produkt může probíhat v jedné nebo ve dvou fázích. Dvoufázový (nepřímý) proces výroby je složen ze dvou kroků, a to z homogenizace (obvykle ve šnekovém extrudéru, na který navazuje granulovací zařízení) a následného zpracování některou z běžných technologií – extruzí, injekčním vstřikováním nebo termolisováním. V jednofázovém (přímém) procesu probíhá homogenizace v jednom cyklu s následnou výrobou. Tento typ výroby je uplatňován při přímé extruzi využívající protiběžný dvojšnekový extruder (paralelní nebo kónický) nebo přídavný homogenizátor, z něž pak tavenina postupuje kontinuálně do výrobní formy. Kromě přímé extruze lze jednofázový proces výroby realizovat také přímým injekčním vstřikováním, tento typ zpracovacího procesu však není příliš běžný. [8], s. 61-62]

U obou typů je výrobní proces vždy zahájen homogenizací surovinové směsi (přípravou komponentu), která může být realizována samostatně, nebo jako součást další fáze. Mísení složek se provádí dvěma typy technologií – homogenizačním systémem v mísiči nebo kontinuálním systémem využívajícím hnětač a extruder. Homogenizace v dávkovacím mísiči procesně zajišťující mísičí prvky umístěné v míchači a termokinetický efekt, všechny složky směsi jsou dákovány najednou. Kontinuální homogenizace je realizována na šnekovém extrudéru (se souběžným nebo protiběžným dvojšnekem nebo v planetovém válcovém extrudéru). V tomto případě mohou být složky surovinové směsi rovněž dákovány najednou, nebo se plnivo promíchané s aditivou dákuje do již roztaveného termoplastu. Oddělené dákování většinou vyžaduje zpracování ve vakuu, které umožňuje odstranění vlhkosti v jeho průběhu. Pokud jsou procesy homogenizace a následného zpracování směsi na produkt odděleny, homogenizovaná surovinová směs se dále granuluje. Před dalším zpracováním je granulát opět nutné zbavit vlhkosti. [8], s. 61; [13], s. 2-149]

Dvoufázový výrobní proces pokračuje dále některou ze jmenovaných technologií, tedy extruzí, injekčním vstřikováním nebo termolisováním. **Extruze** využívá posunu taveniny vodorovným ohraničeným zahříváním prostřednictvím šnekového dopravníku, který zároveň slouží jako hnětací prvek. Standardně se v komerční výrobě uplatňují extrudéry: [13], s. 2-149]

- jednošnekové – zpravidla vybavené šnekem o poměru délka / šířka 24:1 nebo 30:1 s gravitační násypkou pro dákování surovin, podélnou sušičkou nebo násypkou s odvodem vlhkosti, zahřívání po délce nebo v ústí šneku. Nevýhody této technologie obvykle zahrnují vyšší heterogenitu směsi, nižší objemový výkon, horší průchod

taveniny a tím i riziko překročení maximální teploty tavení a implicitně poškození struktury plniva,

- dvojšnekové se souběžnou rotací – jsou nejčastěji využívány pro homogenizaci a přímou extruzi profilů. Využívají se při požadavku na vysoký objemový výkon výrobní linky. Vysoká rychlost kluzu taveniny se však vyznačuje obtížemi při řízení výroby,
- dvojšnek s protiběžnou rotací – systém může pracovat s paralelním nebo kónickým provedením šroubovic šneku. Pro tento typ technologie by měla být surovinová směs upravena na částice o velikosti procházející sítím s otvory 0,4 mm. Extruder je obvykle vybaven vakuovým průduchem a vyhřívaným ústím i šneky. Tento systém se zpravidla využívá pro kvalitní homogenizaci nebo v přímé extruzi,
- kónický dvojšnek – má speciálně upravené šneky s vyšším průměrem v sekci pro dávkování, který se k ústí extrudéru postupně snižuje, čímž dochází ke změnám tlaku na taveninu podél výrobního zařízení s dobrým vlivem na kvalitu mísení. U této technologie je nejnižší riziko tepelného poškození plniva.

Druhým typem dvoufázového procesu je homogenizace, na kterou navazuje injekční **vstřikování** směsi do formy s dutinou ve tvaru konečného produktu. Zařízení pro vstřikování je obvykle opatřeno menší extruzní jednotkou vysokého výkonu. Na ústí extrudéru navazuje vyhřívaná forma (obvykle dvoudílná) vybavená zařízením pro automatické odformování.

1.4 Vlastnosti a uplatnění dřevoplastového kompozitu, vliv přísad

Aplikace dřevoplastových kompozitů nachází své uplatnění především v automobilovém a stavebním průmyslu. Zatímco v automobilovém odvětví se nejčastěji využívají vstřikované dílce pro jakostní vybavení interiérů, ve stavebnictví se jejich vlastností využívá převážně pro dílce uplatňované v exteriéru. Primární aplikací dřevoplastového kompozitu v tomto odvětví jsou podlahové nebo obkladové dílce. Obecně se jedná o stavební prvky nenosné, zejména tzv. decking systémy, tedy plošné terasové podlahové systémy, venkovní zahradní chodníky, obklady a pochůzná plochy kolem bazénů, zábradlí apod.

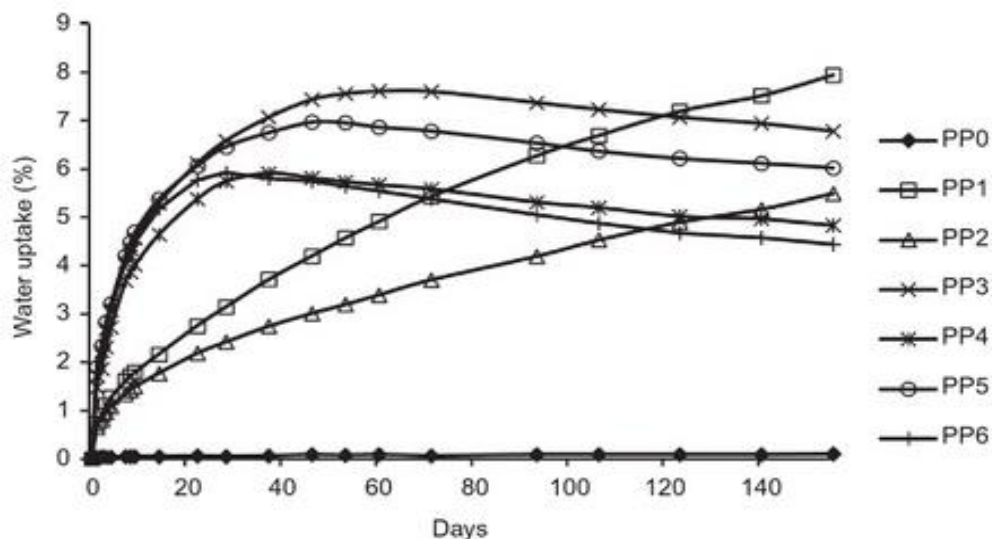
Exteriérové aplikace kladou vysoké požadavky na odolnost materiálu, zejména z toho důvodu, že se dřevoplastový kompozit v porovnání s masivním dřevem, které alternuje, považuje za materiál s velmi nízkými nároky na údržbu. Výhody a aplikační vlastnosti kompozitu jsou tak spojeny především s jeho odolností, která je dosažena synergií obou hlavních složek. Hlavními požadavky na decking systémy jsou tuhost, odolnost hoření a

biotickým a abiotickým činitelům, jejichž nízké hodnoty vedou ke znehodnocování produktů a rychlému krácení životnosti. [17], s. 73]

Dřevoplastové kompozity založené na polyolefinové matrici tvoří v současné době nejvyšší podíl komerčního trhu, z tohoto důvodu se vývoj v této oblasti zaměřuje právě na dosažení optimálních vlastností u venkovních dílců vyrobených z polyetylénu a polypropylénu. Oba tyto polymery disponují podobnými charakteristikami. Friedrich a Breuer [17], s. 74-89] uvádí výstupy několika studií provedených na polyolefinových dřevoplastových kompozitech orientovaných na zlepšování jejich cílových vlastností prostřednictvím úpravy surovinové směsi vybranými aditivami ve vhodném poměru. Studie se zaměřovali vždy na konkrétní vlastnosti, jejichž optimalizace je nezbytná pro vystavení v exteriéru.

1.4.1 Fyzikální vlastnosti

První z těchto vlastností je obsah vody a její následná absorpce v provozních podmínkách, které ovlivňují jak rychlost degradace vlivem změn teplot, tak působení biotických činitelů, včetně bakterií, plísní a hub. Pro obsah vody a nasákavost dřevoplastového kompozitu je určující jednak surovinové složení (podíl hydrofilního plniva, jeho počáteční vlhkost a také vlhkost v průběhu zpracování, podíl kompatibilizéru, obsah lubrikantu), jednak postup v průběhu zpracování. Principiálně platí, že čím lépe je plnivo obaleno termoplastovou matricí, tím je míra absorpce vody a objemových změn spojených s cyklickým navlháním a vysoušením nižší. Tato skutečnost byla ověřena na sérii zkušebních těles s polypropylénovou matricí zkouškou ponoření do vody podle standardizovaných postupů. Nasákavost byla srovnávána mezi vzorky různých směsí, které se lišily v plnění dřevní moučkou (pouze polymer / kompozit), obsahu kompatibilizéru, přísady lubrikantu a antimikrobiální (biocidní) přísady. Výsledky nasákavosti uvádí následující Graf 1.



Graf 1 Nasákavost dřevoplastového kompozitu s polypropylénovou maticí o různém složení surovinové směsi [17], s. 82]

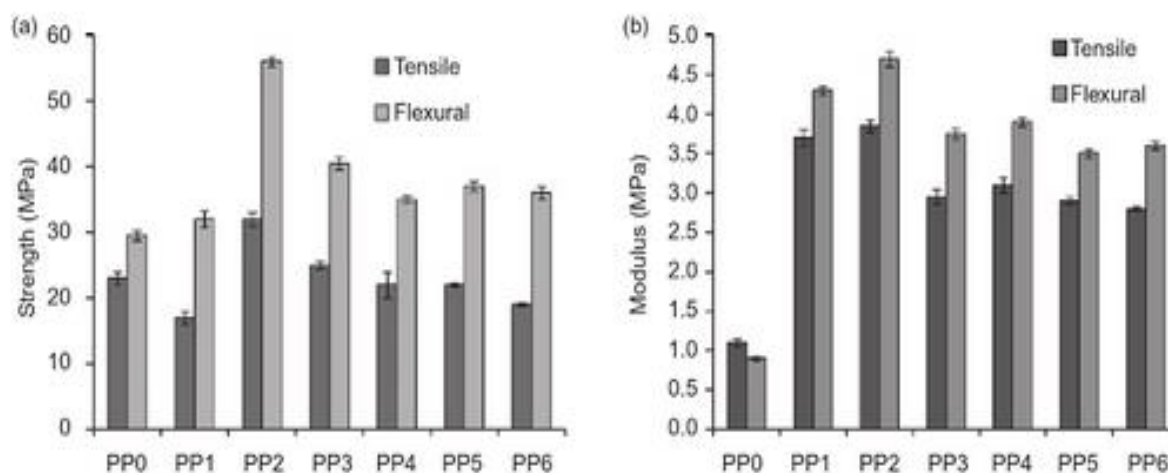
PP0 = 100% PP, PP1 = 40% PP / 60% plnivo, PP2 = PP1 s 5% kompatibilizérem, PP3 = PP2 s obsahem retardéru hoření, PP4 = PP3 s obsahem lubrikantu, PP5 = PP3 s obsahem biocidní přísady, PP6 = PP3 s obsahem lubrikantu i biocidní přísady.

Z grafu je patrných několik jevů. Prvním z nich je výrazná hydrofobita neplněného polymeru (PP0), která dosahuje minimálních hodnot po celou periodu nasákání. U všech vzorků, které obsahovaly retardér hoření, byl vykázan značný nárůst nasákavosti ve 40-60 dnech, poté nasákavost postupně klesá. Vzorky neobsahující retardér hoření (PP1 a PP2) se vyznačovaly stabilní nasákavostí v průběhu celé sledované periody, přičemž vzorek s obsahem kompatibilizéru dosáhl konečnou nasákavost po 150 dnech ponoření do vody téměř poloviční.

Klesavou tendenci nasákavosti vzorků s obsahem retardéru hoření, který je obvykle hydrofilní a rozpustný ve vodě, lze připsat jeho postupnému vymývání ze struktury kompozitu. Ta by měla být dále ověřena úbytkem hmotnosti vysušeného tělesa. Vzorek s obsahem lubrikantu, který zlepšuje kvalitu a uzavření zrn plniva na povrchu kompozitu a zvyšuje tím jeho homogenitu, vykázal dle předpokladů lepší chování ve vodním prostředí vlivem blokace přístupu vlhkosti k plnivu hydrofobním povrchem. Jeho integrací se snižuje vlhkost absorbovaná na povrchu, a tím i klesající vlhkostní gradient směrem do vnitřní struktury kompozitu. Nejlepších hodnot nasákavosti pak bylo dosaženo u vzorků obsahujících hydrofobní biocidní přísadu, jež je formulována především s cílem zamezit přístupu vlhkosti a vody k hydrofilním složkám.

1.4.2 Mechanické vlastnosti, životnost

Na stejné sadě zkušebních těles autoři hodnotili mechanické vlastnosti, které jsou spojeny s celkovou tuhostí materiálu, a to jak počáteční po výrobě, tak ovlivněné ponořením do vodní lázně. Chování kompozitu v provozním zatížení vyjadřují tahové a ohybové charakteristiky. Dřevoplastový kompozit daného složení byl hodnocen s cílem stanovit jednak vliv surovinové směsi na jeho mechanické vlastnosti, jednak na chování při působení vlhkosti. Na následujících grafech (Graf 2) jsou uvedeny stanovené mechanické vlastnosti, kde nejvyšších hodnot dosáhly směsi PP3, tedy obsahující termoplastovou matici s plnivem vylepšenou pouze kompatibilizérem. Přídavek dalších přísad omezuje součinnost na rozhraní fází polypropylen / dřevní vlákna, která obvykle přenášejí tahové a ohybové napětí, což vede ke snížení počátečních hodnot mechanických charakteristik.

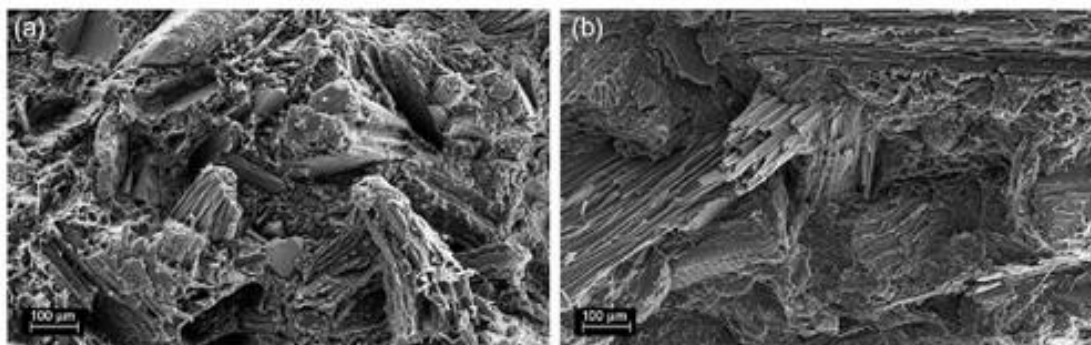


Graf 2 Mechanické vlastnosti dřevoplastového kompozitu s polypropylénovou maticí o různém složení surovinové směsi, a) pevnostní charakteristiky, b) modul pružnosti [17], s. 75]

Tensile = tahové vlastnosti, Flexural = ohybové vlastnosti

PP0 = 100% PP, PP1 = 40% PP / 60% plnivo, PP2 = PP1 s 5% kompatibilizérem, PP3 = PP2 s obsahem retardéru hoření, PP4 = PP3 s obsahem lubrikantu, PP5 = PP3 s obsahem biocidní přísady, PP6 = PP3 s obsahem lubrikantu i biocidní přísady.

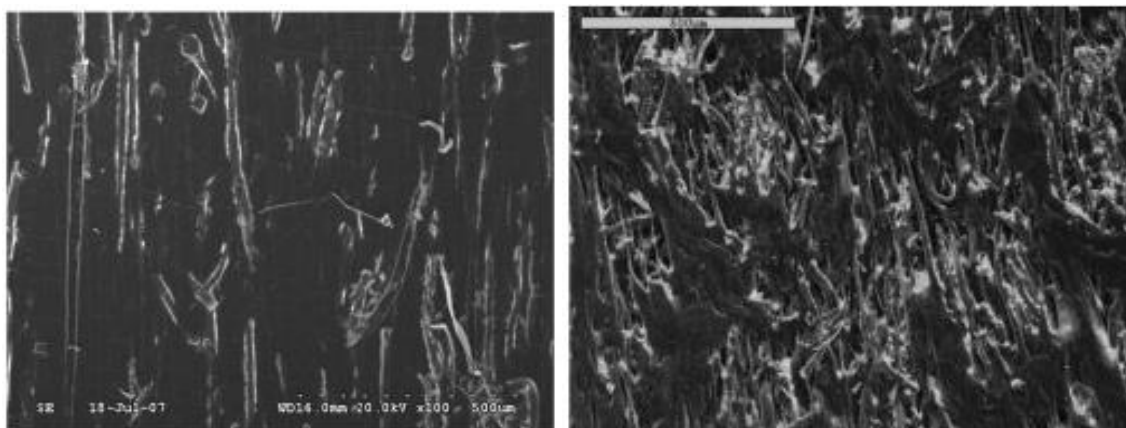
Rozdíl v homogenitě struktury kompozitu vylepšené kompatibilizérem je patrný na následujícím obrázku (Obrázek 1). Struktura kompozitu s kompatibilizérem je mnohem kompaktnější a neobsahuje tak vysoký podíl drobných kavit.



Obrázek 1 SEM snímky lomové plochy vzorků: a) PP1 (bez kompatibilizéru) a b) PP2 (s kompatibilizérem). [17], s. 80]

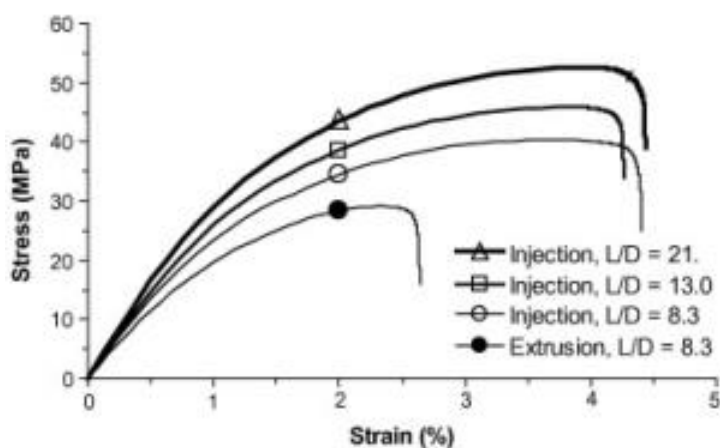
Vystavení vlhkosti pak může u kompozitu způsobit snížení na úrovni tahových i ohybových pevností. Dle dané studie [17], s. 83] byla po vodní lázni tělesa zatěžována v obou režimech a to jak v mokřem stavu, tak kontrolně po následném vysušení při 70 °C po 24 hod. Ztráta v oblasti tahových vlastností se zejména u vzorků, které neobsahovaly v surovinové směsi přísady omezující příjem vlhkosti, pohybovala až v rozmezí 15-25 %.

Významný vliv na pevnostní charakteristiky kompozitu má také vybraný proces zpracování materiálu do konečného produktu a parametry plniva. To bylo prokázáno studií Migneaulta a kol. [20], s. 80-85] zabývající se srovnáním vlivu procesu výroby a parametrů plniva kompozitu s matricí z vysokohustotního polyetylénu. Surovinové směsi pro tyto dvě vybrané technologie se lišily složením v souvislosti s požadavky jednotlivých kroků zpracování, a také průměrnou délkou zrna, která se řádově pohybovala kolem 0,2 (index velikosti plniva délka / šířka byl 8,3), 0,3 (13,0) a téměř 0,5 mm (21,3), průměrná šířka byla přibližně shodná (22-23 µm). U směsí připravených vstřikováním byl použit lubrikant pro snadnější odformování. Kvalita povrchu byla studována prostřednictvím rastrovací elektronové mikroskopie (SEM). Na následujícím obrázku (Obrázek 2) jsou SEM snímky povrchů zkušebních těles vyrobených vstřikováním a extruzí. U vstřikovaných těles (vlevo) je patrná rovnoběžná struktura vláken plniva, která souhlasí se směrem vstřikování a hladký povrch. Snímek extrudovaného zkušebního tělesa (vpravo) se vyznačuje neuspořádanou strukturou vláken a povrchovými imperfekcemi.



Obrázek 2 Povrch vyrobených zkušebních těles – vlevo vstřikovaných, vpravo extrudovaných. [20], s. 80-85]

Vliv různé délky vláken lze odvodit z průběhu napětí-ovo-deformačních křivek, které jsou uvedeny na následujícím grafu (Graf 3). Z výsledků měření je patrné, že délka vláken má pouze mírný vliv na celkové chování kompozitu, vzhledem k přibližně shodnému napětí i deformaci vstřikovaných zkušebních těles s variabilním parametrem plniva. Graf 3 rovněž poukazuje na rozdílné chování vstřikovaného a extrudovaného kompozitu. Extrudované zkušební těleso dosáhlo menší deformace při celkově nižším napětí při porušení.



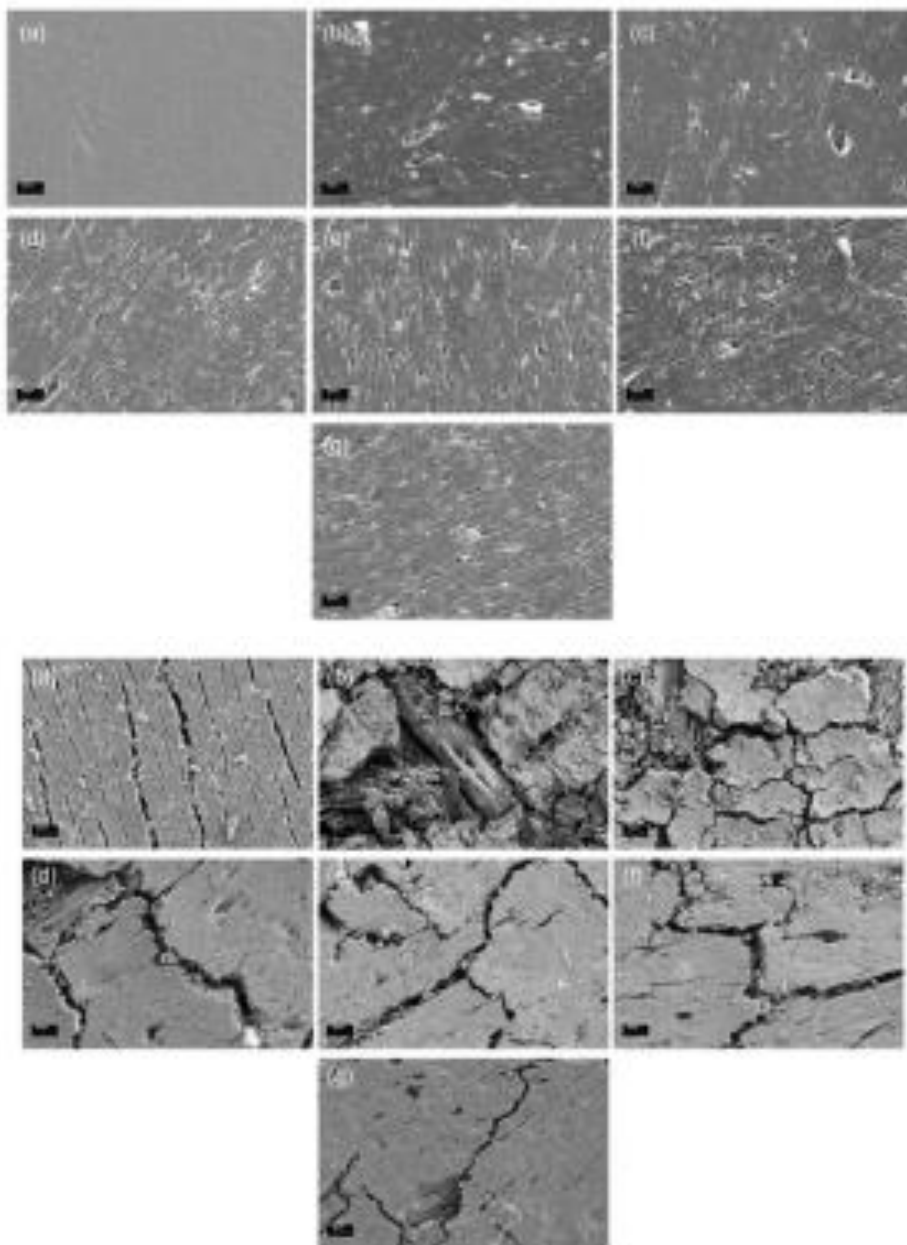
Graf 3 Napětí-ovo-deformační křivky zkušebních těles vstřikovaných s různou délkou vláken (uveden index velikosti plniva L/D) a extruzí. [20], s. 84]

Kromě výše uvedených testů provedli autoři Friedrich a Breuer [17], s. 78-79] také srovnání vlivu obsahu retardéru hoření v surovinové směsi. Jelikož všechny směsi, jež obsahovaly retardér hoření, měly stejný podíl, výsledky těchto zkoušek byly v porovnání se směsmi bez retardéru obdobné.

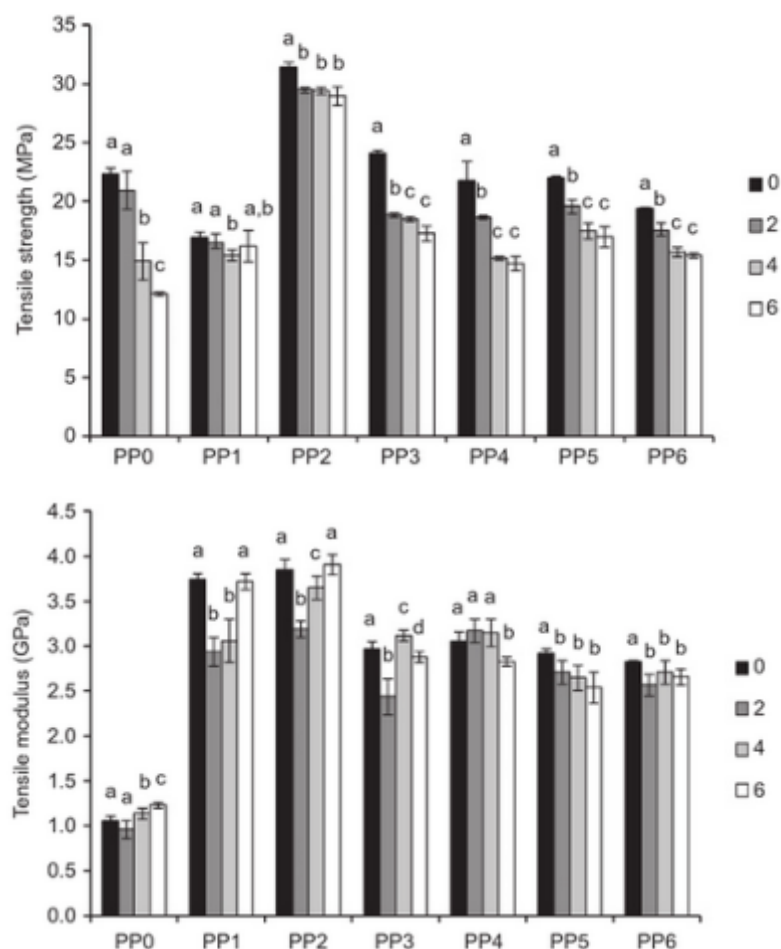
1.4.3 Dlouhodobá životnost, přirozený exteriér

Významným faktorem, ovlivňujícím životnost kompozitu, je expozice synergického působení teploty, vlhkosti a slunečního záření, které je v UV oblasti významně degradativní

zejména pro termoplastovou matici. Friedrich a Breuer [17], s. 85] se v tomto směru zaměřovali nejen na vliv na mechanické vlastnosti, ale i na povrchové změny kompozitu. Zkouška byla provedena vystavením přímému působení povětrnosti. Rozdíl v kvalitě povrchu vzorků je patrný z následujícího obrázku (Obrázek 3). Vliv na mechanické vlastnosti (pevnost v tahu) je uveden v grafu (Graf 4).



Obrázek 3 SEM snímky povrchu kompozitu s polypropylénovou maticí před (vlevo) a po (vpravo) vystavení exteriérovému prostředí, a) PP0 = 100% PP, b) PP1 = 40% PP / 60% plnivo, c) PP2 = PP1 s 5% kompatibilizéru, d) PP3 = PP2 s obsahem retardéru hoření, e) PP4 = PP3 s obsahem lubrikantu, f) PP5 = PP3 s obsahem biocidní přísady, g) PP6 = PP3 s obsahem lubrikantu i biocidní přísady. [17], s. 85 a 86]



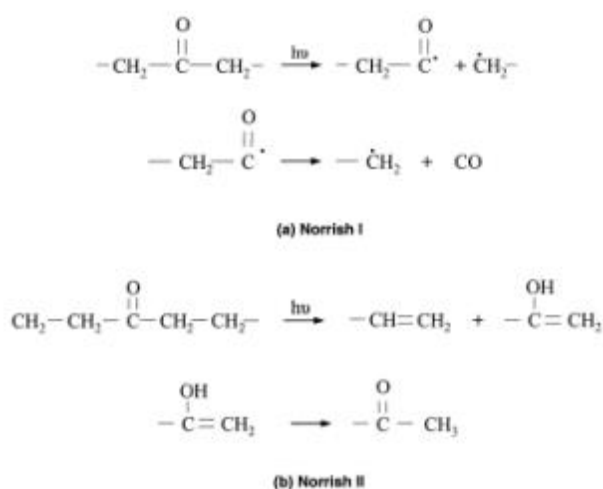
Graf 4 Vliv vystavení exteriéru na tahovou pevnost (nahore) a modul pružnosti (dole) dřevoplastového kompozitu s polypropylénovou matricí, hodnoty stanoveny po 2, 4 a 6 měsících. [17], s. 87 a 88]
 PP0 = 100% PP, PP1 = 40% PP / 60% plnivo, PP2 = PP1 s 5% kompatibilizéru, PP3 = PP2 s obsahem retardéru hoření, PP4 = PP3 s obsahem lubrikantu, PP5 = PP3 s obsahem biocidní přísady, PP6 = PP3 s obsahem lubrikantu i biocidní přísady.

Z grafů znázorňujících úbytek pevnostních charakteristik (Graf 4) lze odvodit chování kompozitu při zatížení tahem po vystavení podmínkám exteriéru. Charakteristicky nízký modul pružnosti neplněného termoplastu je zvýšen u všech vzorků kompozitu, nevyšší hodnoty tahových pevností i modulu pružnosti v tahu dosáhly vzorky obsahující největší podíl plniva a vylepšené kompatibilizérem (PP3) zajišťujícím dostatečnou interakci plniva a matrice při odolávání zatížení. Ostatní vzorky kompozitu obsahující další přísady měly přibližně vyrovnané hodnoty, nejnižších dosáhly vzorky bez lubrikantu a biocidní přísady (PP4), u nichž zvýšená hydrofilnost a narušení struktury rozpouštěním retardéru hoření způsobilo výrazný pokles pevnosti v tahu i modulu pružnosti.

Lze však předpokládat, že delší vystavení kompozitního materiálu exteriérovým podmínkám (počítáno řádově v letech) signifikantně sníží vysoké hodnoty u kompozitu neobsahujícího lubrikant ani biocidní přísadu, jelikož se vlivem vlhkosti bude dále narušovat

jak povrch, tak vnitřní struktura kompozitu. To je zřejmé z míry poškození povrchu (vznik mikrotrhlin) na SEM snímcích (Obrázek 3), které je patrné při srovnání změny u snímků označených jako c). Postupný nárůst hodnot modulu pružnosti, který lze zaznamenat u jednotlivých vzorků, je pravděpodobně zapříčiněn zvýšením krystalinity polypropylénu, jež je obvykle iniciována UV zářením. Delší expozice by však vedla k jeho postupné degradaci, jejíž začátek je patrný u směsi PP4, PP5 a PP6 s nižším obsahem polypropylénu.

Hlavním degradačním vlivem, který způsobuje změny chemické struktury polymeru i plniva při vystavení exteriéru je fotodegradace. Fotodegradace polymeru je charakterizována dvěma fotochemickými reakcemi – Norrishovou reakcí typu I a II. Ty byly popsány ve studii Starka a Matuany [21], s. 2263-2273] a definují děje spojené s fotodegradací dřevoplastových kompozitů. Průběh reakcí uvádí následující Obrázek 4. Reakční mechanismus obou reakcí na sebe navazuje. Vlivem fotooxidace dochází ke štěpení funkčních skupin makromolekul polymeru a vzniku volných karbonylových radikálů (Norrishova reakce I), které následně narušují koncové i průběžné makromolekuly a vytváří karbonylové a vinylové skupiny na konci rozštěpených řetězců (Norrishova reakce II). Reakční mechanismus Norrishových reakcí uvádí Obrázek 4.

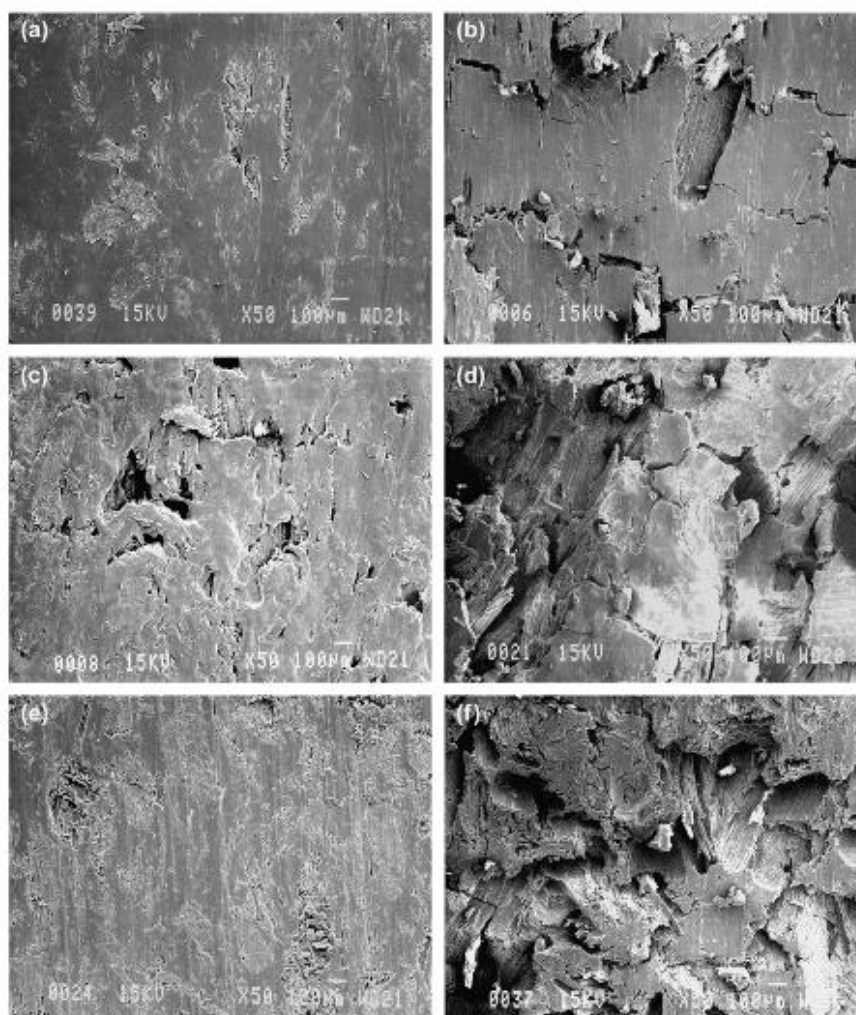


Obrázek 4 Norrishovy reakce popisující fotodegradaci matrice dřevoplastového kompozitu [21], s. 2263]

1.4.4 Zrychlené testování životnosti

Kromě přímého zatížení přirozenými podmínkami exteriéru lze na životnost resp. trvanlivost dřevoplastového kompozitu usuzovat také tzv. zrychlenými testy stárnutí. V jejich případě nemusí vždy zkouška navazovat na synergii všech nepříznivých faktorů, ale může se soustřeďovat pouze na vliv jednoho z nich (vlhkost, extrémně zvýšená nebo snižená teplota, působení UV záření apod.).

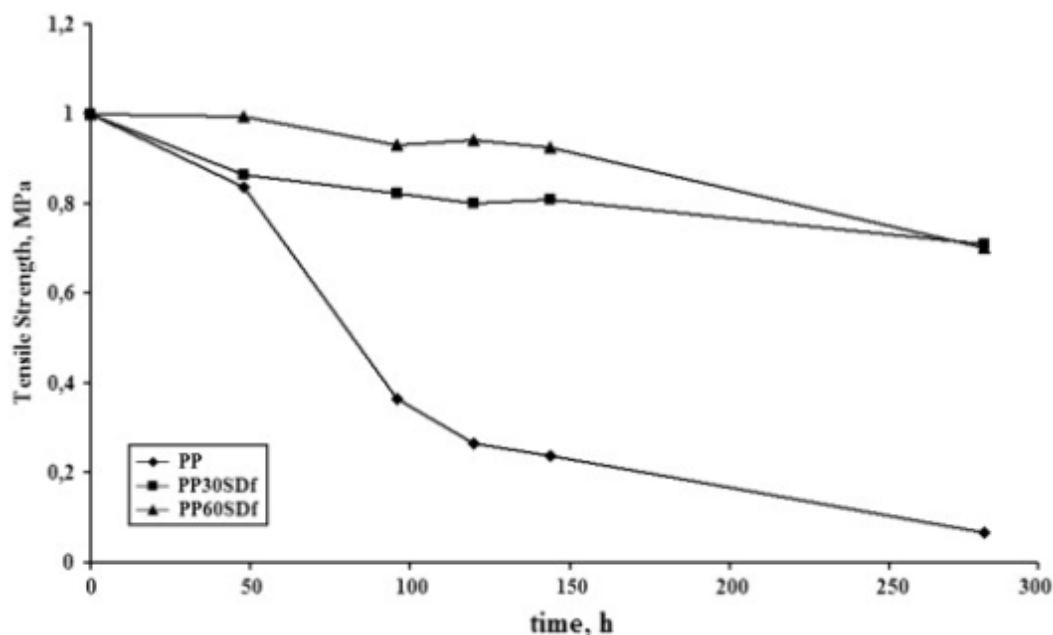
Jednou z metod zrychleného testu životnosti dřevoplastového kompozitu je vystavení působení UV záření, které je primárně orientováno na porušení matrice, a postupné porušování integrity plniva je následným doprovodným jevem. Studii vystavení dřevoplastového kompozitu UV záření realizovali Stark a Matuana [22], s. 1883-1890], jednalo se o kompozit s matricí z vysokohustotního polyetylenu naplněný dřevní moučkou při podílu 50 %, přičemž zpracování bylo provedeno třemi metodami – injekčním vstřikováním, extruzí a nařezáním z extrudovaných dílů. Zrychleného stárnutí bylo dosaženo prostřednictvím xenonové lampy. Expozice byla realizována ve dvouhodinových cyklech, vždy 108 min osvitů a 12 min kropení vodou. Porušení integrity povrchu vzorků bylo posuzováno na základě SEM snímků, které jsou uvedeny na následujícím obrázku (Obrázek 5). Největší míru porušení integrity povrchu lze pozorovat u vzorků připravených extruzí a následným nařezáním.



Obrázek 5 Porušení integrity povrchu zkušebních těles dřevoplastového kompozitu z vysokohustotního polyetylenu s 50% plněním dřevními vlákny před (vždy vlevo) a po (vždy vpravo) cyklickém ozařování připravené: [22], s. 1887]

a), b) vstřikováním; c), d) extruzí a e), f) nařezáním extrudovaných desek.

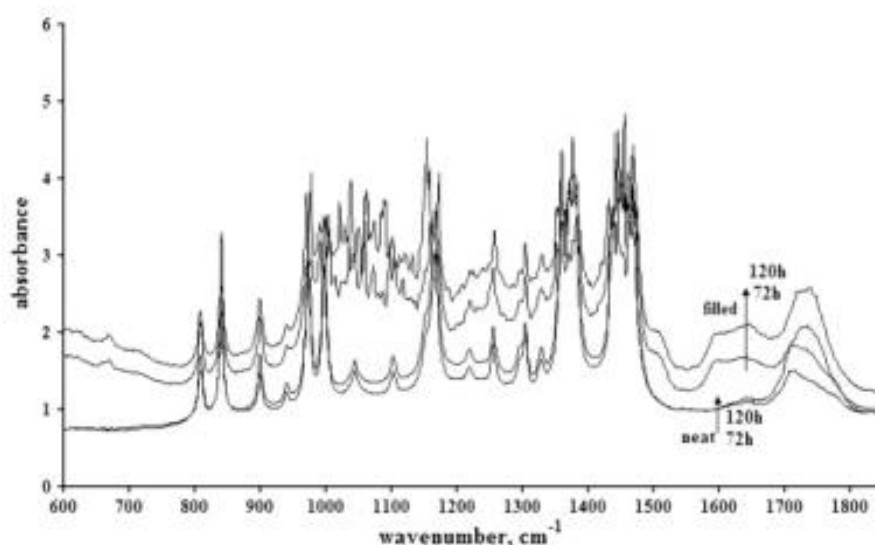
Studii vlivu zrychleného stárnutí na vizuální a mechanické vlastnosti dřevoplastového kompozitu s polypropylenovou maticí provedli La Mantia a Morreale [23], s. 1252-1258]. Kompozit byl připraven v plnění 30 a 60 % a zpracován temolisováním. K testování zrychleným stárnutím bylo využito testovací komory s UV-B ozařovacími lampami, přičemž testovací cyklus trval 8 hodin ozařování při teplotě 55°C a 4 hodiny kondenzace při teplotě 35°C. Vyhodnocení tahové pevnosti bylo realizováno v časových odstupech 48, 72, 120, 144 a 280 hodinách a uvádí jej následující Graf 5. Ten zobrazuje funkční závislost tahové pevnosti na době ozařování, přičemž výchozí hodnota odpovídá původní tahové pevnosti před začátkem ozařování. Jak je patrné z grafu, výrazný pokles byl zaznamenán u neplněného polymeru, hodnoty u obou kompozitů dosáhly po 280 hodinách cyklického zrychleného testu stárnutí poklesu přibližně o 25 %. Výchozí hodnoty tahové pevnosti však byly značně rozdílné – u kompozitu s 30% plněním dosáhla stanovená tahová pevnost hodnoty 23,3 MPa, u kompozitu s 60% plněním 13,4 MPa. Neplněný kompozit vykázal počáteční tahovou pevnost 32,8 MPa.



Graf 5 Tahová pevnost zkušebních těles jako funkce času ozařování u vzorků neplněných (PP), s 30% (PP30) a 60% (PP60) plněním. [23], s. 1254]

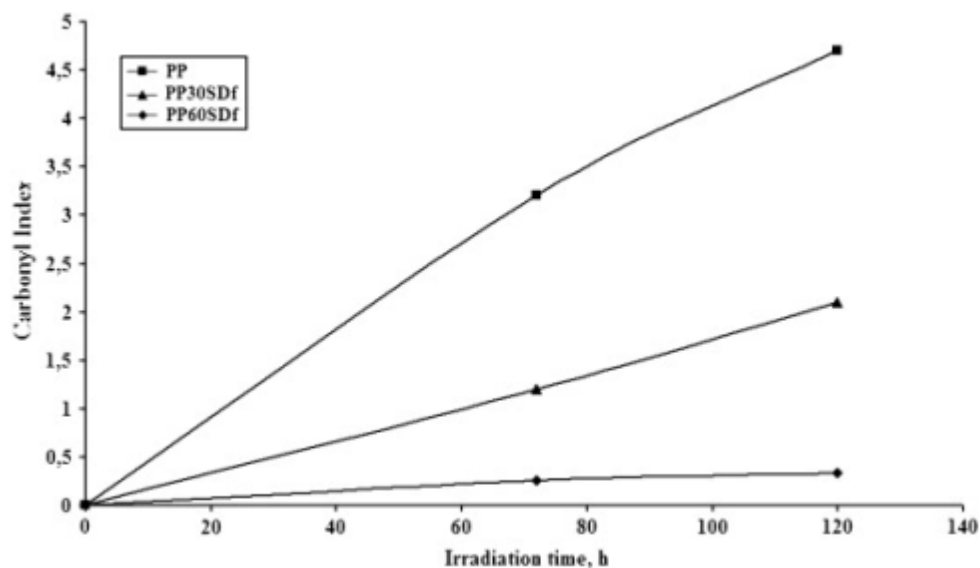
Míra ozáření byla dále stanovená tzv. karbonylovým indexem, který odpovídá množství vzniklých karbonylových skupin, jež jsou produktem Norrishovy reakce I. typu. Karbonylový index se stanoví jako poměr intenzity (absorbance) vybraných spektrálních pásů naměřených prostřednictvím FTIR spektroskopu. Pro polypropylen se tyto pásy vyskytují v oblasti

skupinových vibrací polymerů na vlnočtu 1680-1800 cm^{-1} . Spektra pro stanovení karbonylového indexu byla měřena po 7 a 120 hodinách a jsou uvedena na následujícím spektrogramu (Spektrogram 1).



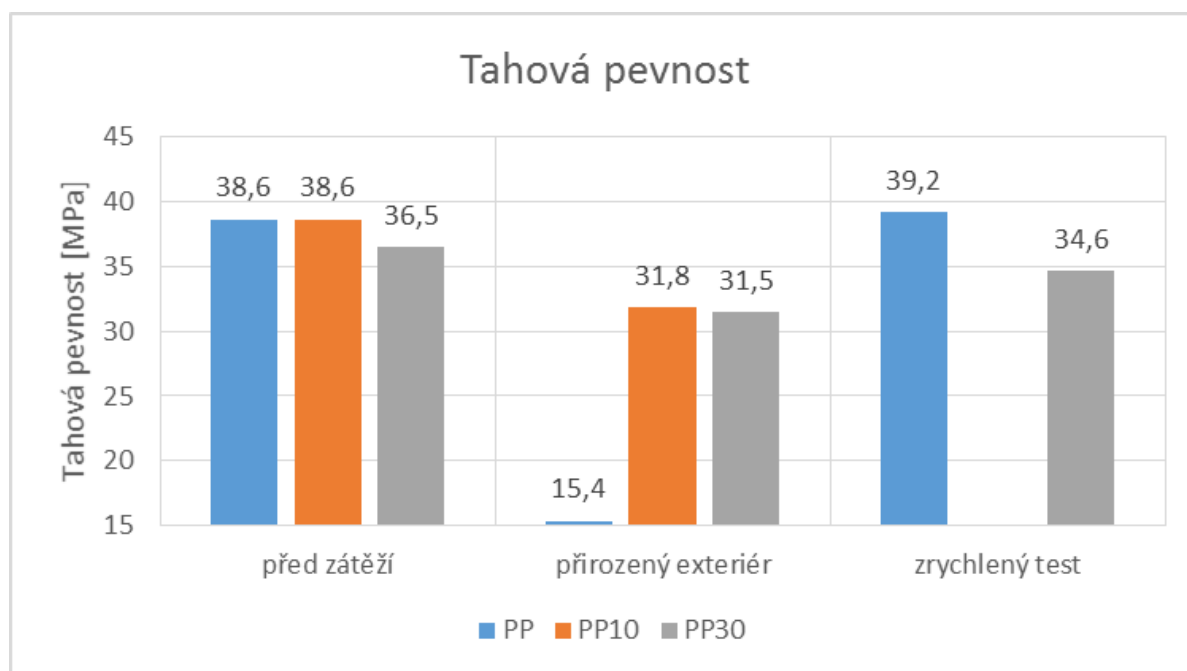
Spektrogram 1 Spektrogram zkušebních těles z polypropylenů neplněných (neat) a kompozitu s 30% plněním (filled) naměřená po 72 a 120 h. Změna intenzity (absorbance) byla hodnocena na vlnočtu 1680 cm^{-1} . [23], s. 1255]

Karbonylový index byl stanoven jako funkční závislost na čase ozařování. Jeho vyhodnocení uvádí následující Graf 6. Z grafu je patrný výrazný nárůst karbonylových skupin po 72 a 120 hodinách ozařování v návaznosti na obsah polymeru. Neplněný polypropylen dosáhl nejvyšší hodnoty (5), nejnižší hodnoty naopak dosáhl kompozit s 60% plněním.



Graf 6 Karbonylový index zkušebních těles jako funkce času ozařování u vzorků neplněných (PP), s 30% (PP30) a 60% (PP60) plněním. [23], s. 1255]

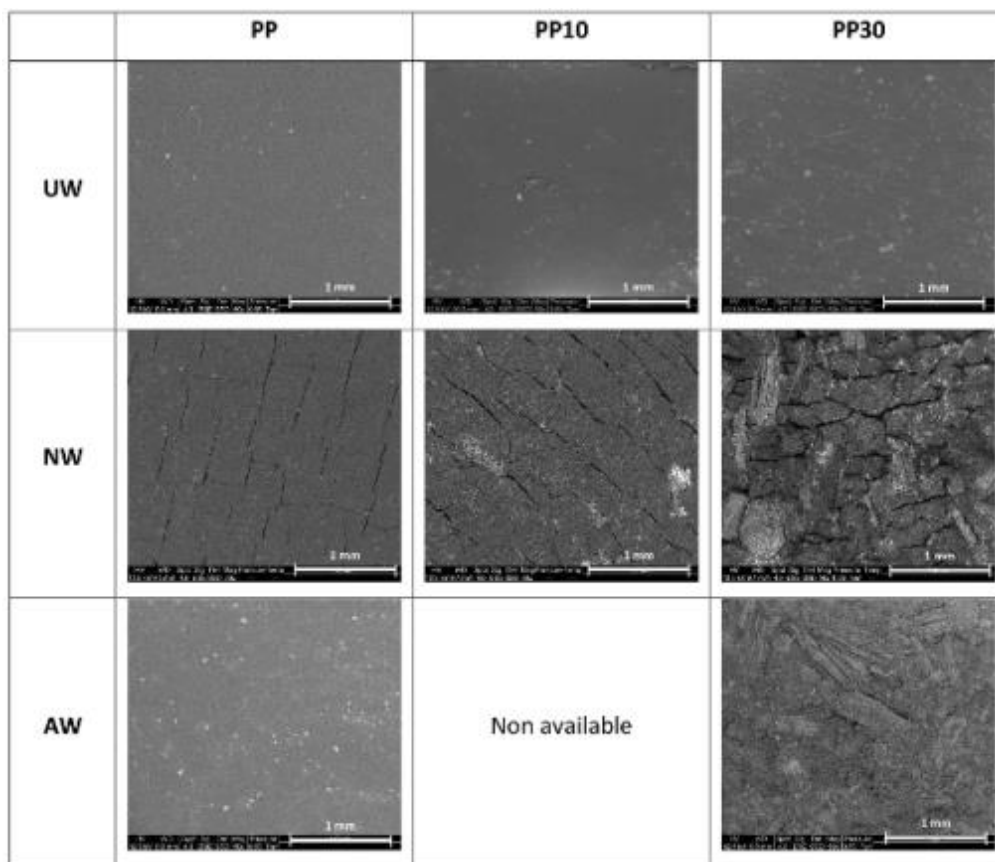
Srovnání dlouhodobé zátěže zkušebních těles s polypropylénovou maticí se zrychleným testem stárnutí realizovali ve své studii Badji a kol. [24], s. 162-172]. Kompozity byly plněny 10 a 30 % podílem dřevní moučky. Zatěžování probíhalo přímou expozicí exteriérovým podmínkám Francie během jednoho roku (vzorky uloženy na konstrukci, aby byl osvit realizován pod úhlem 45°C) a v komoře s xenonovou lampou v průběhu 14 dnů (celkem 168 cyklů ovitu po 120 minutách, přičemž cyklus zahrnoval 102 minut osvitu a 12 minut skrápění). Vyhodnocení tahové pevnosti je uvedeno v následujícím grafu (Graf 7). Z grafu je patrný výrazný pokles tahové pevnosti neplněného polymeru při venkovní expozici, ovšem mírný nárůst hodnoty tahové pevnosti při vystavení UV záření. Tento jev lze připsat skutečnosti, že ve struktuře polypropylenu v postprodukční aplikaci obvykle ještě nějakou dobu dochází k dodatečnému síťování zejména při působení UV záření, které je iniciátorem reakcí. To ovlivňuje především pevnostní charakteristiky polymeru. U vzorků vystavených dlouhodobému působení synergie exteriérových vlivů však byl nejvyšší stupeň polymerace dosažen a následně došlo k uplatnění Norrishových reakcí, které vedly k destrukci makromolekul.



Graf 7 Tahová pevnost zkušebních těles před expozicí a vystavených přirozeným exteriérovým podmínkám a zrychlenému stárnutí, upraveno dle [24], s. 166]

Vliv na povrchovou integritu autoři [24], s. 169] hodnotily prostřednictvím SEM. Jak lze usuzovat ze snímků uvedených na následujícím obrázku (Obrázek 6). Porušení integrity povrchu po vystavení venkovní expozici byly výrazně vyšší u všech vzorků, nejvýrazněji se

projevilo u vzorků s 30% plněním. Vzorky neplněného polypropylenu nevykazovaly po vystavení zrychlenému testování žádnou míru porušení.

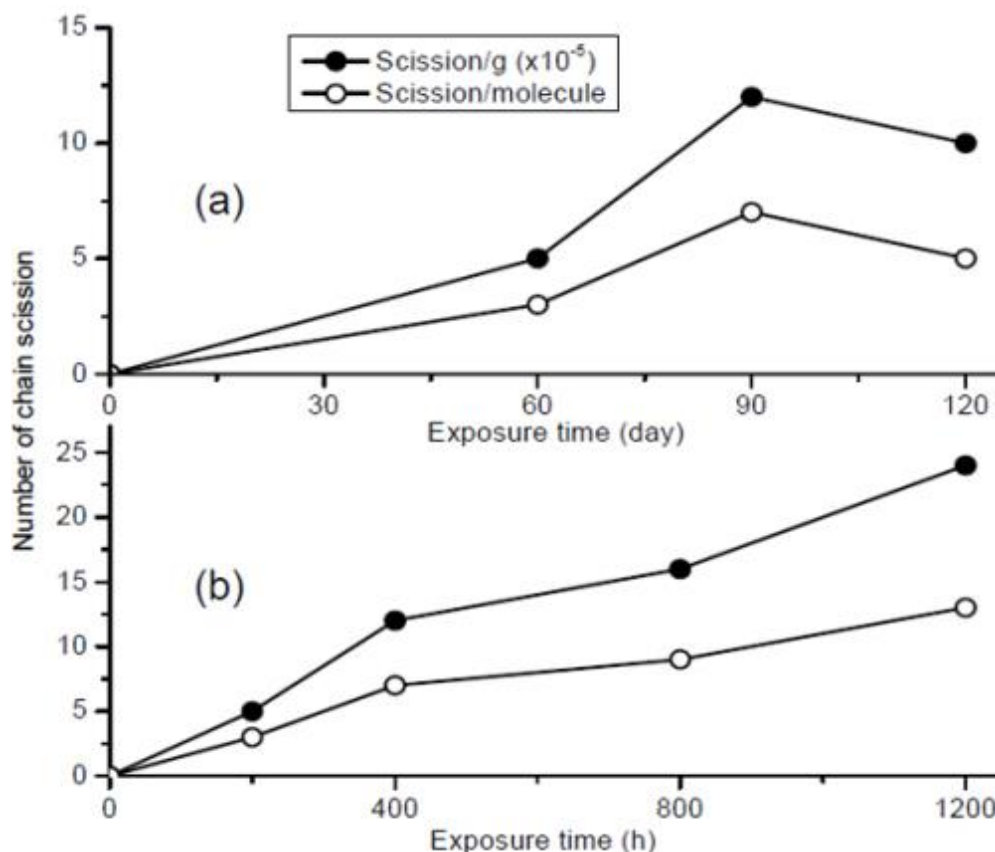


Obrázek 6 Porušení integrity povrchu zkušebních těles dřevoplastového kompozitu z polypropylenu neplněného (PP) a kompozitů s 10 (PP10) a 30% (PP30) plněním dřevní moučkou: [24/, s. 169]
UW – před zátěží, NW – zátěž přirozenou expozicí, AW – zátěž zrychleným stárnutím.

Obdobné srovnání vlivu dlouhodobé zátěže podmínkami exteriéru a zrychleným stárnutím realizovali ve své studii také Fabiyi a McDonald [25], s. 275-290]. Zkušební tělesa byla připravená pouze v jednom typu směsi 40 % polypropylénu a 60 % dřevní moučky. Testování životnosti bylo provedeno vystavením exteriérovým podmínkám Idaho (USA), expozice trvala 4 měsíce (srpen – listopad), přičemž průměrná teplota dosahovala 2,2-14,7°C, teplotní minimum bylo 1,2°C, teplotní maximum 28,9°C. Hodnocení vybraných vlastností bylo realizováno po 30, 60, 90 a 120 dnech, vystavení bylo provedeno pod úhlem 45° na jižní stranu. Zrychleného stárnutí bylo dosaženo prostřednictvím ozařovací komory s xenonovou lampou a hodnocení vybraných vlastností bylo provedeno po 200, 400, 800 a 1200 hodinách.

Hodnocení vlivu nepříznivého prostředí bylo zaměřeno na posouzení změn chemické struktury matrice kompozitu. Jedním z nich bylo i posouzení míry štěpení řetězců, jehož vyhodnocení uvádí následující Graf 8. Z výstupů je patrný výrazný nárůst počtu rozštěpených řetězců v obou expozicích, z čehož lze usuzovat na rychlejší reakce štěpení než síťování, ke

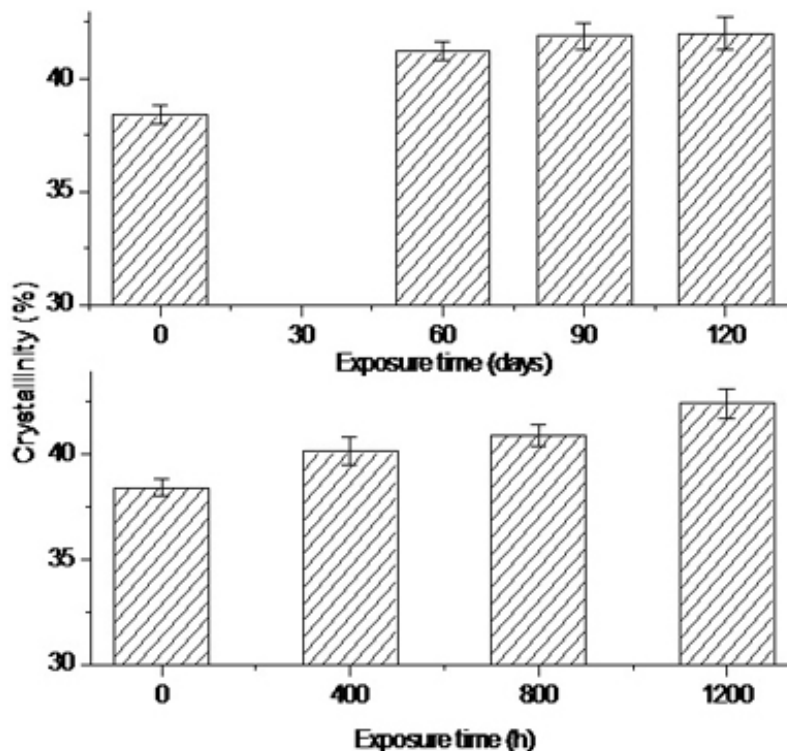
kterému během degradace rovněž v polypropyleny dochází. To dokazuje i výsledek hodnot přítomnosti rozštěpených řetězců u venkovní expozice, kdy se jejich počet po 120 dnech v porovnání s hodnotami po 90 dnech snížil. Nárůst počtu rozštěpených makromolekulových řetězců při expozici v ozařovací komoře měl spíše lineární charakter.



Graf 8 Počet rozštěpených řetězců v návaznosti na dobu expozice, a) venkovní expozice, b) zrychlené stárnutí [25], s. 275-290]

Autoři [25], s. 275-290] se rovněž zabývali vlivem expozice na krystalinitu polymeru, jež byla stanovena metodou DSC, tedy stanovení teploty tání a přiřazením odpovídající hodnoty krystalinity. Vyhodnocení změn v míře krystalinity polymeru vlivem expozice ilustruje následující Graf 9. Z grafu je patrný nárůst krystalinity jak u zkušebních těles vystavených exteriérové expozici, tak u vzorků v ozařovací komoře. Vyšší stupeň krystalinity je spojen s procesy, které ovlivňují strukturu makromolekulových řetězců v postprodukční aplikaci. Polypropylen (stejně jako další polymery) vlivem dosmršťování, zvýšené teploty a působení UV záření, které se pojí s vystavením přirozenému nebo umělému slunečnímu osvětlení mění svou chemickou strukturu. Působením těchto faktorů dochází k přeuspořádání makromolekulové struktury polymeru do krystalické formy, což dále ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti polymeru a projevuje se zejména zvýšením hustoty, pevnostních charakteristik a tvrdosti povrchových vrstev. Tento aspekt se negativně projevuje na

křehkosti, rázové houževnatosti a tažnosti polymeru. Vzhledem ke krátké době expozice (činící u vystavení exteriéru pouhé čtyři měsíce) lze předpokládat postupný pokles krystalinity v návaznosti na synergii degradujících faktorů (především vlhkosti a cyklického střídání vysoké a nízké teploty).



Graf 9 Krystalinita polymerní matrice v návaznosti na dobu expozice: venkovní expozice (nahore) a zrychlené stárnutí (dole) [25], s. 275-290]

1.4.5 Uplatnění dřevoplastového kompozitu

Dřevoplastový kompozit nachází uplatnění zejména ve dvou klíčových oblastech. První z nich je automobilový průmysl, kde se často využívá k výrobě interiérových prvků, jako jsou palubní desky, výplňové plastové díly apod. Druhou významnou oblastí je právě stavebnictví. Zde nachází uplatnění zejména ve formě decking systémů. Obecně se však dřevoplastové kompozity dále uplatňují také v příbuzných průmyslových odvětvích, jako je například nábytkářství. Celkově se tak kromě výplňových dílů a decking systémů z dřevoplastového kompozitu vyrábí menší nenosné stavební prvky, jako jsou rámy oken a dveří, drobné zahradní zboží, plotové systém, díly pro řešení nábytku a části spotřebního zboží. V roce 2012 dosáhla produkce dřevoplastového kompozitu v Evropské unii 260 tisíc tun, podíly jednotlivých odvětví jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 1). [26], s. 9-15]

Tabulka 1 Produkce dřevoplastového kompozitu v dotčených odvětvích v roce 2012 [26], s. 10]

Odvětví	Produkce [tun]
Decking systémy	174,000
Automobilový průmysl	60,000
Obklady a plotové systémy	16,000
Strojírenské aplikace	5000
Nábytek	2500
Spotřební zboží	2500

Uplatnění ve formě decking systému a menších nenosných prvků pro zahradní aplikace je u dřevoplastového kompozitu nejčastější. Venkovní (ale i interiérové) obkladové prvky se však kromě snadné manipulovatelnosti, montáže a údržby, které mají signifikantní význam pro uživatele, vyznačují také nízkou akustickou propustností. Lopéz v [19], s. 363] realizoval studii akustické propustnosti dřevoplastového kompozitu z mechanické vlákniny v polypropylénové matrici, který srovnával s kompozitem z polypropylénové matrice plněného skelnými vlákny a sádrokartonem. Na základě výsledků výzkumu bylo zhodnoceno, že takto připravené kompozitní materiály jsou více zvukově izolační. Další zlepšení této vlastnosti lze dosáhnout přidávkem anorganického plniva (uhličitanu vápenatého, nanojílu apod.).

Rozšiřující se uplatňování dřevoplastového kompozitu jako alternativy masivního dřeva v exteriérových aplikacích vyžaduje optimální složení surovinové směsi, která dále ovlivňuje jeho schopnost odolávat vnějším podmínkám. Volba vhodných příměsí a přísad je tak nedílnou součástí návrhu konečného dílce směřující k maximalizaci jeho životnosti a uživatelské přívětivosti. Pro dosažení vhodných vlastností kompozitu musí tedy být vždy zřejmé předpokládané podmínky, jímž bude v dané aplikaci vystaven.

2 Modifikace dřevoplastového kompozitu

Modifikace dřevoplastového kompozitu se obdobně jako vylepšování surovinové směsi realizuje s cílem dosáhnout určitého progresu v jeho vlastnostech, jež by měl představovat přidanou hodnotu v rámci jeho výrobního procesu nebo pro konečného uživatele. V souladu s trendem rozvíjení environmentálně přívětivých stavebních systémů a prvků směřuje i další modifikace materiálu, jež pro výrobu z velké části využívá ropné produkty, k výzkumu a vývoji možností uplatnění druhotných surovin v této oblasti.

U dřevoplastového kompozitu lze modifikaci druhotnými surovinami provést na dvou úrovních, a to jako modifikaci termoplastové matrice odpadními plasty obdobného chemismu, nebo jako modifikaci plniva příměsemi. Jelikož dřevní hmota (dřevitá moučka, dřevní vlákna, piliny) sama o sobě může být tvořena odpadním produktem dřevařského průmyslu, orientuje se vývojová činnost v této problematice na možnosti uplatnění různých forem odpadu zpracování dřeva, papírnictví, a také příměsí druhotných surovin, které by nahradily současné aplikace vylepšujících filerů anorganického charakteru. V následujících podkapitolách je provedena rešerše výzkumu v těchto vybraných oblastech.

2.1 Modifikace matrice

Modifikace termoplastové matrice dřevoplastového kompozitu odpadními plasty je logickým vyústěním problematiky spojené s dalším zpracováním plastového odpadu. Pro výrobu dřevoplastového kompozitu a dalších stavebních materiálů na bázi plastu lze využít odpadní plastový materiál z výroby stavebních dílců a prvků (zejména trubních systémů) a plastový odpad z obalů spotřebního zboží pro domácnosti, který tvoří významný podíl na celkovém plastovém odpadu. Předpokladem využití takového odpadu je však vhodný způsob separace eliminující heterogenitu druhotné suroviny. [27], s. 469]

Jedním ze zásadních kritérií pro použití recyklovaného polymeru v matici dřevoplastového kompozitu je jeho dostupnost. Druhotná surovina je obvykle získávána z běžného komunálního odpadu domácností. Jedná se především o termoplasty využívané primárně ve formě obalových materiálů (polyetylen, polypropylen a jejich směsi). Vzhledem k narůstajícím cenám ropných produktů a derivátů, lze využití odpadních termoplastů jako suroviny pro výrobu kompozitu považovat za správný krok, bude-li ovšem prokázáno, že splňují požadovaná kritéria aplikace. [28], s. 76]

Lze předpokládat, že plná nebo částečná náhrada matrice recyklovaným polymerem ovlivní vlastnosti konečného produktu, a to zejména z toho důvodu, že na rozdíl od

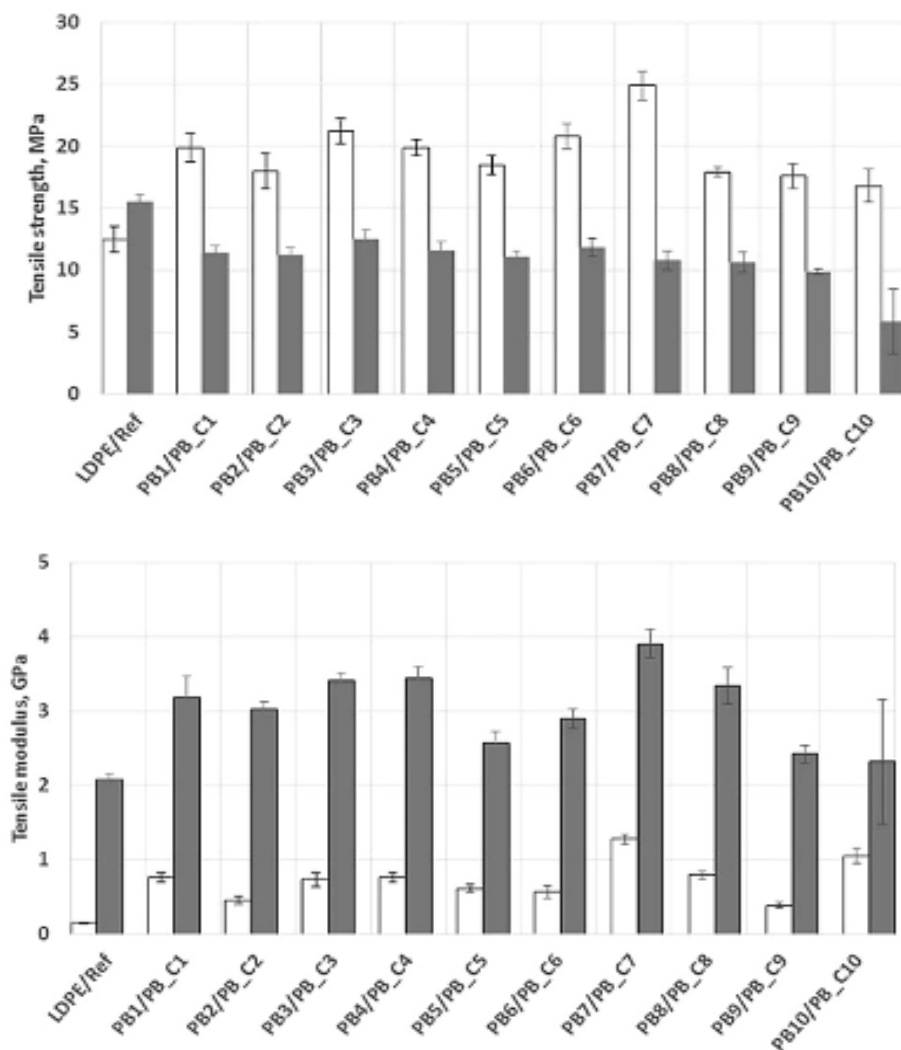
primárního (panenského – virgin) polymeru obvykle obsahuje určité procento reziduí jiných směsných polymerů vlivem recyklačního procesu, zbytkové nečistoty, které nelze dokonale odstranit, aditiva nezbytná pro původní aplikaci, a také odlišnou makromolekulovou strukturu, která je dána opětovným tepelným zpracováním nutným pro výrobu regranulátu. Tyto skutečnosti jsou reflektovány ve fyzikálním, chemickém a mechanickém charakteru termoplastu i vyrobeného kompozitu.

Odlišné chování kompozitu vyrobeného z matrice, v níž je zcela nebo částečně nahrazen primární polymer, lze posoudit s ohledem na jeho mechanické a termické vlastnosti, fyzikální vlastnosti zejména při vystavení vlhkosti nebo vodnímu prostředí či působení chemických látek, a ovlivňuje také míru adheze k plnivu kompozitu. Studium těchto aspektů se zabývá řada odborných prací, jejichž výstupy jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

2.1.1 Mechanické vlastnosti a morfologie

Turku a kol. [27], s. 469-476] provedli studii vlivu použití odpadního plastu na mechanické a tepelné vlastnosti dřevoplastového kompozitu. Pro výrobu zkušebních těles byl použit recyklát z konstrukčních plastů, konkrétně z odpadního polypropylenu a polyetyleny, přičemž pro jednotlivé směsi bylo provedeno další třídění na základě vlastností plastů (zejména s ohledem na zdroj a ohybové pevnosti). Zkušební tělesa – z neplněného polymeru a kompozitní – byla připravena dvěma způsoby zpracování. Tělesa z neplněných směsí byla vstřikována, kompozitní tělesa byla připravena extruzí. Referenční vzorky byly obdobným postupem vyrobeny z nízkohustotního polyetylenu. Všechny typy zkušebních těles byly testovány z hlediska mechanických vlastností, nasákavosti a bobtnání, a zároveň na nich byla provedena termická analýza (stanovení teploty skelného přechodu). Surovinová směs byla vylepšena anhydridovým kompatibilizérem MAPE a lubrikantem, plnivo tvořila smrková dřevní moučka s průměrnou délkou vláken 2,1 mm. Poměry složek surovinové směsi byly PE nebo směsný PE+PP/dřevní moučka/kompatibilizér/lubrikant = 40/54/3/3, dávkování v hmotnostních procentech. [27], s. 470]

Celkem byly vyrobeny vzorky 11 typů neplněných plastů a 11 typů směsí. Cílem provedených zkoušek bylo stanovit vliv plniva na celkové vlastnosti výsledného materiálu. Srovnání tahových pevností a modulu pružnosti v tahu je uvedeno v následujícím grafu (Graf 10).



Graf 10 Srovnání tahové pevnosti (nahore) a modulu pružnosti v tahu (dole) u vzorků neplněného polymeru (PE nebo směsný recyklát PE+PP), bílá – neplněné polymery, šedá – kompozity. [27], s. 471]

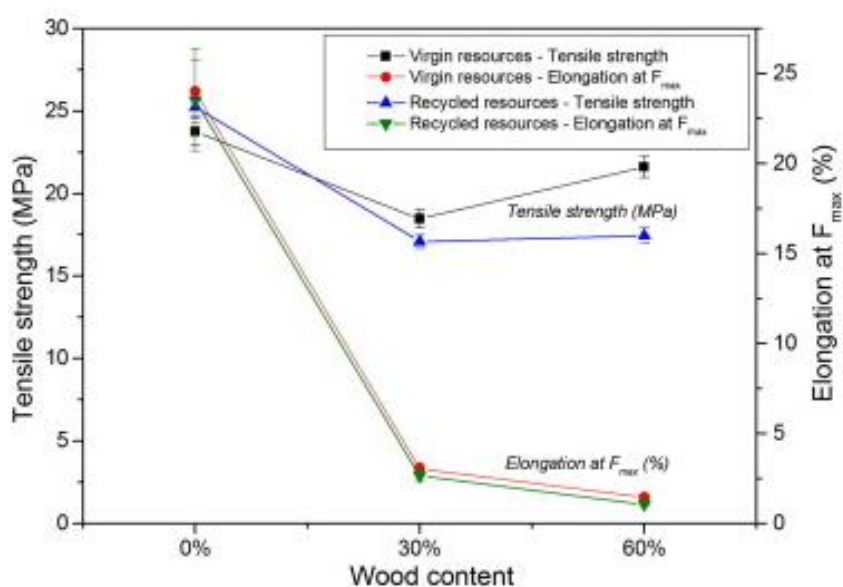
U všech vzorků byl patrný výrazný rozdíl v tahových pevnostech i modulu pružnosti mezi plněnými a neplněnými typy směsí. Tento rozdíl je dán charakterem plniva, které přenáší tahové zatížení. Tento jev je zřejmý u referenční směsi nízkohustotního polyetyleny, kde se pevnosti v tahu i modul pružnosti po naplnění zvýšily. Nízkohustotní polyetylen má obecně nižší tahové pevnosti než polypropylen, který vyztužuje směsné PP+PE kompozity. Rozdíl v hodnotách tahové pevnosti je možné také připisovat rozdílnému procesu přípravy vzorků a nedostatečné kompatibilitě plniva s matricí při nízkém přídavku kompatibilizéru, kdy lze předpokládat vyšší homogenitu vstřikovaných neplněných zkušebních těles v porovnání s extrudovanými kompozity.

Thurku a kol. [27], s. 472-473] zaznamenali také zvýšení Youngova modulu (pružnosti v tahu), které bylo u všech směsí zapříčiněno zvýšením tuhosti vyztužením dřevní hmotou. Z grafu (Graf 10) je rovněž zřejmá vysoká variabilita v pevnostních charakteristikách napříč

spektrům směsí. V tomto směru je tedy nutné vždy před výrobou stanovit konkrétní vlastnosti polymeru, aby bylo možné zajistit kvalitativní úroveň sériové výroby.

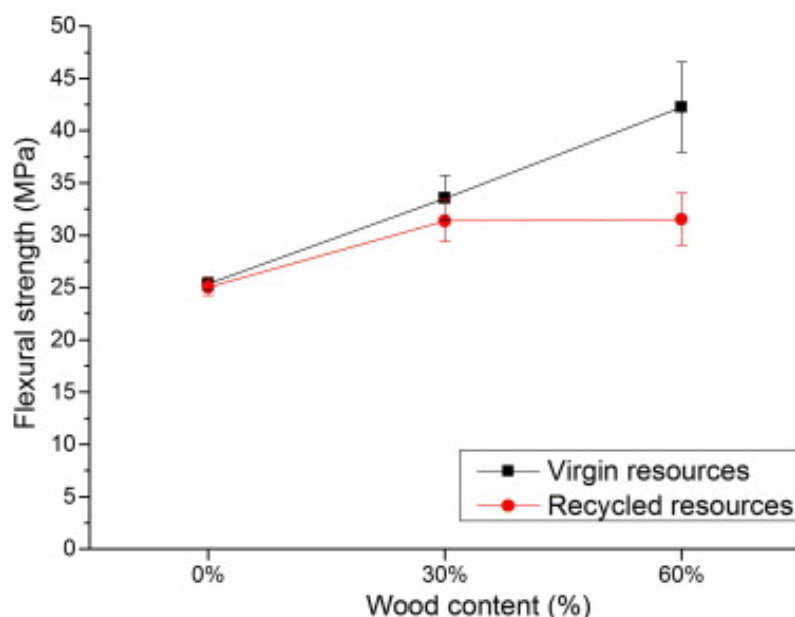
Kromě pevnostních charakteristik v tahu byly vzorky podrobeny také stanovení pevnosti a modulu pružnosti v ohybu a rázové houževnatosti. Průběh hodnot ohybové pevnosti a modulu pevnosti v ohybu měl obdobný charakter, jako u tahových charakteristik. Pevnosti byly tím vyšší, čím vyšší byl podíl polyetylenu ve směsi. Polypropylén naopak zvyšoval hodnoty modulů pružnosti. Podíl polyetylenu navíc ovlivnil rázovou houževnatost. Vzorky z nízkohustotního polyetylenu dosáhly až $8,53 \text{ kJ/m}^2$, u směsných polymerů byla hodnota vyšší než 6 kJ/m^2 pouze u směsi s podílem 84 %hm. polyetylenu v matrici.

Sommerhuber a kol. [28], s. 76-85] realizovali studii vlivu celkové náhrady HDPE matrice recyklátem recythen® HDPE plněným odpadním dřevem. Studie směřovala k ověření chování polymeru jako takového komparací s neplněným primárním plastem, a také kompozitu při 30 a 60% plnění odpadní resp. přímo vyráběnou dřevní moučkou při 3% obsahu maleinanhydridového kompatibilizéru. Hodnoty tahové pevnosti a poměrného prodloužení zobrazuje Graf 11. Jak je patrné, vývoj tahové pevnosti i poměrného prodloužení měl podobný průběh. U tahové pevnosti došlo u vzorků z primárního polymeru k výraznějšímu nárůstu v tahové pevnosti při 60% plnění. Obdobného výsledku bylo dosaženo i u ohybové pevnosti, jejíž hodnoty jsou uvedeny na dalším grafu (Graf 12). Zatímco u vzorků kompozitu z primárního polymeru měl nárůst ohybové pevnosti při zvyšujícím se podílu dřevního plniva přibližně lineární trend, vzorky z recyklátu vykazaly pouze mírný nárůst.



Graf 11 Srovnání tahové pevnosti a protažení u vzorků kompozitu připravených z primárního polymeru

(virgin resources) a recyklátu (recycled resources) při různém plnění dřevní moučkou. [28], s. 81]



Graf 12 Srovnání ohybové pevnosti u vzorků kompozitu připravených z primárního polymeru (virgin resources) a recyklátu (recycled resources) při různém plnění dřevní moučkou. [28], s. 81]

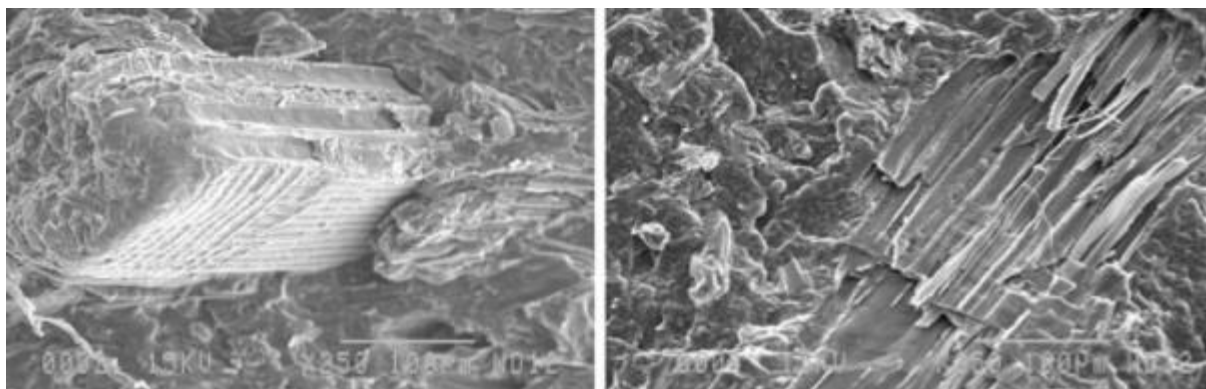
Vliv rozdílného procesu zpracování odpadních polymerních směsí a přidavku kompatibilizéru byl verifikován také ve studii, kterou realizovali Bertin a Robin [29], s. 2255-2264]. Autoři srovnávali zkušební tělesa z neplněných směsí polyetylenu a polypropylenu z odpadu z domácností. V této studii byla zkušební tělesa vyráběna jednošnekovou a dvoušnekovou extruzí. U směsí polyetylenu a polypropylenu, které jsou nekompatibilní, se vždy vlivem rozdílné teploty tání objevovaly malé částice polypropylenu, které se chovaly jako plnivo. Zpracování dvoušnekovým extrudérem, které je účinnější, vedlo ke zvýšení homogenity směsí projevující se v hustotě a mechanických vlastnostech.

Vliv přidavku kompatibilizéru na vlastnosti kompozitu z recyklovaného polymeru sledovali Adhikary a kol. [30], s. 807-815] zkoumáním pevnostních charakteristik primárního a recyklovaného polyetylenu. U vzorků s obsahem recyklátu byl zaznamenán nárůst tahových i ohybových pevností v porovnání s primárním polymerem, což může být důsledek obsahu přísad (lubrikantu) v původní směsi, nebo reziduí směsných polymerů, které se v primárním polymeru nevyskytovali. Zároveň byl testován vliv přidavku kompatibilizéru, který se projevil dalším nárůstem pevností.

Kazemi a kol. [31], s. 487-493] provedli studii mechanických a termických vlastností lehké frakce plastového odpadu z domácností získané flotací. Jednalo se o blokový kopolymer směsného polyolefinu – polypropylenu a polyetylenu. Kompozit byl vyroben dvoufázově –

homogenizací extruzí a poté vstřikováním do forem s různým přídatkem dřevní moučky (10, 20, 30 a 40 %) a 5 % kompatibilizéru v jedné sérii, přičemž jako referenční zkušební těleso byl použit neplněný směsný polymer. Hlavním cílem bylo stanovit vliv přídatku kompatibilizéru (jak pro směsný polymer, tak pro zvýšení kompatibility mezi plnivem a matricí) a různého plnění vláknovým plnivem stejných parametrů na chování kompozitu při zatížení tahem a ohybem. Z výsledků zkoušek tahových charakteristik lze odvodit postupný úbytek tahové pevnosti při nepřítomnosti kompatibilizéru v surovinové směsi. Hodnoty se postupně snížily z 13,0 na 10 MPa. U tahové pevnosti při použití kompatibilizéru byl efekt opačný, s narůstajícím obsahem plniva se hodnota tahové pevnosti postupně zvýšila z 12,7 až na 15,3 MPa. Krápný charakter materiálu byl v obou případech stejný – prodloužení při porušení mělo u vzorků s největším podílem vláknového plniva přibližně poloviční hodnotu. Moduly pružnosti při tahovém a ohybovém zatížení naopak dosáhly zvýšení v obou případech, což lze připsat skutečnosti, že v úvodním nárůstu je zatížení přenášeno převážně vlákny plniva, kdežto postupné porušování vyžaduje interakci obou hlavních složek kompozitu. Obdobný vliv měl přídatek kompatibilizéru na houževnatost materiálu, u níž bylo zaznamenáno zvýšení v průměru o 42 %.

Posouzení rozdílů v oblasti houževnatosti v daném výzkumu [31], s. 487-493] poukázalo na významný vliv složení surovinové směsi na tuto vlastnost. Neplněný směsný polymer s přídatkem kompatibilizační přísady dosáhl o více jak 30 % vyšší vrubové houževnatosti, než zkušební tělesa z neplněného směsného polymeru bez kompatibilizační přísady. Obdobně se hodnoty zvýšily i u kompozitu. Rozdíl v morfologii kompozitů s a bez použití kompatibilizační přísady je patrný také z následujících SEM snímků plochy porušení v tahu (Obrázek 7). U nekompatibilizované směsi došlo při zatěžování v tahu k porušení v matrici, což lze odvodit z celistvého vlákna plniva, které zůstalo vlivem napětí neporušeno. U kompatibilizované směsi je naopak zřejmé porušení v plnivu, které přeneslo zatížení, lze tedy předpokládat větší soudržnost struktury kompozitu.

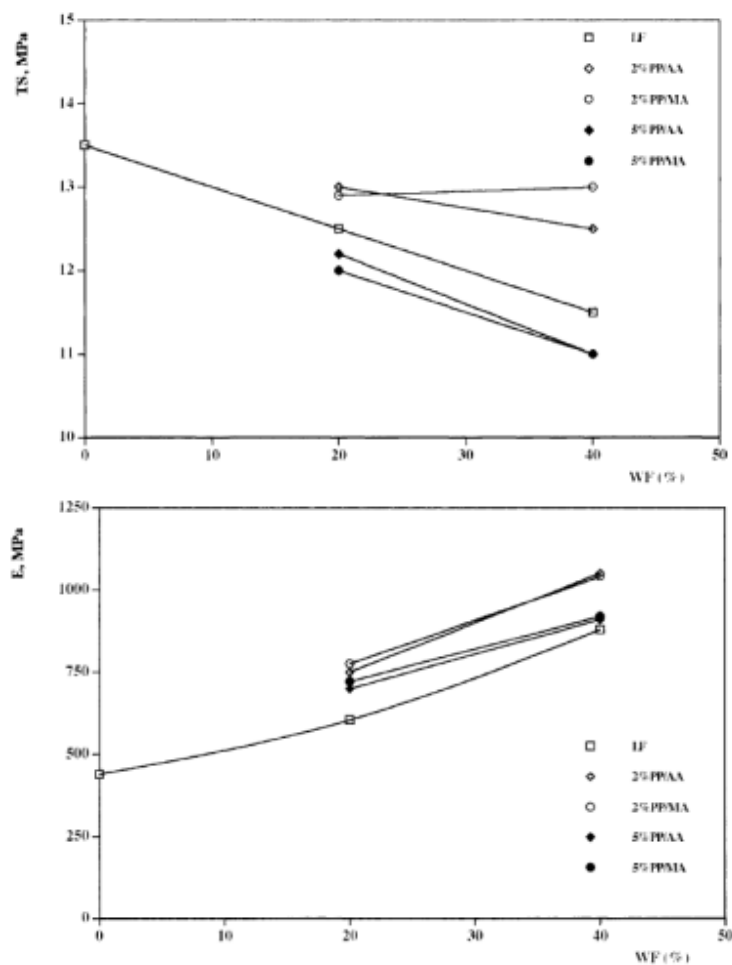


Obrázek 7 SEM snímky porušení v tahu kompozitu ze směsi odpadního polyetylenu a polypropylenu bez kompatibilizéru (vlevo) a s kompatibilizérem (vpravo). [31], s. 487-493]

Chování dřevoplastového kompozitu s matricí ze směsného polyetylénového a polypropylénového recyklátu pod ohybovým zatížením bylo také předmětem studie Cui a kol. [32], s. 657-661]. Autoři se zabývali vlivem různých typů povrchové úpravy dřevní hmoty před vlastním zpracováním kompozitu, a to alkalickou, silanovou a kombinací alkalické a silanové modifikace. Jak studie ukázala, nejlepší výsledků ohybové pevnosti i modulu pružnosti v ohybu dosáhla zkušební tělesa vyrobená ze dřeva modifikovaného kombinací obou metod a po přidavku kompatibilizéru.

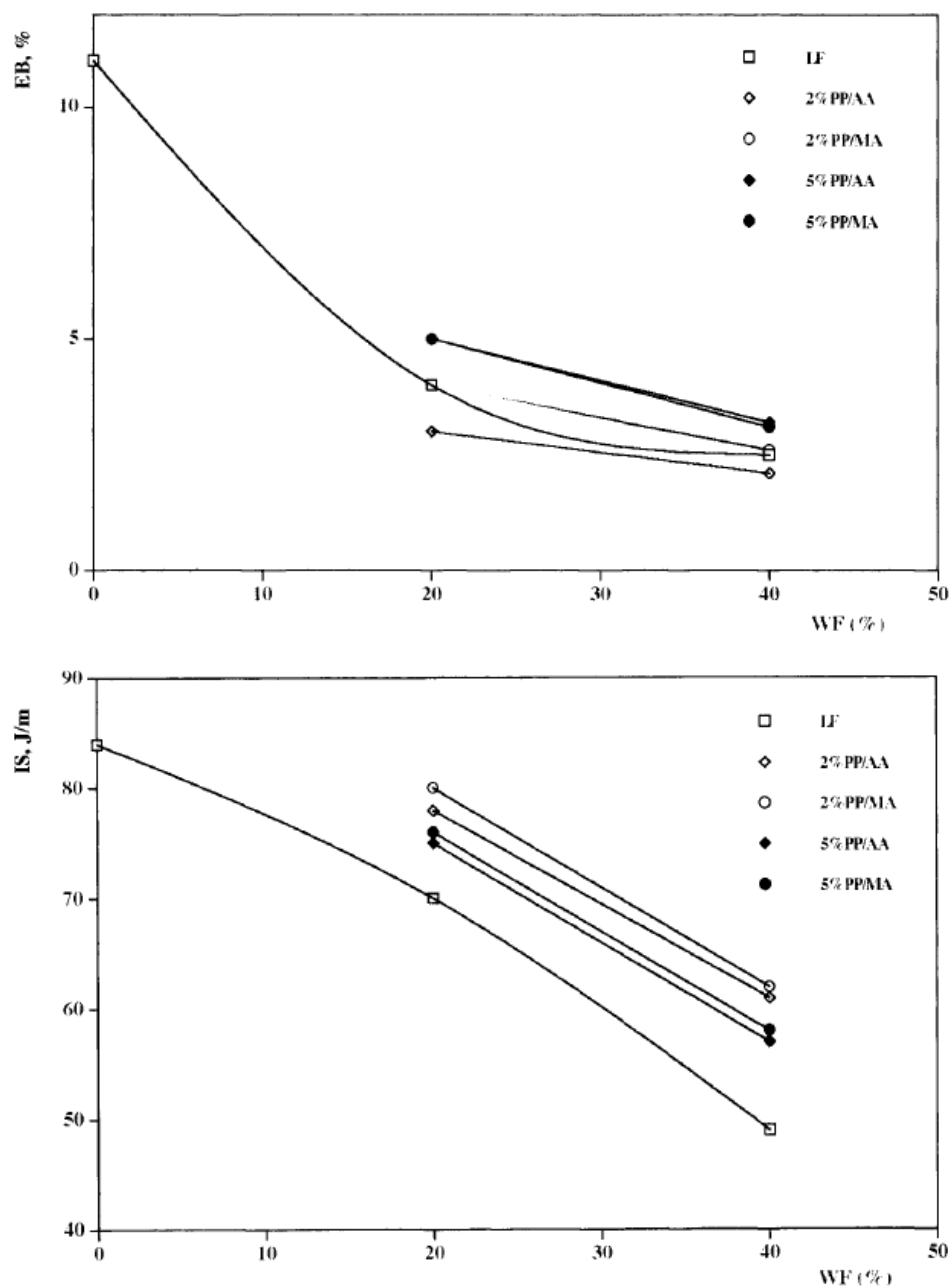
Přímý vliv náhrady polypropylénové matrice dřevoplastového kompozitu recyklátem z plastového odpadu produkovaného domácnostmi byl ověřován studií Kuo a kol. [33], s. 3489-3496]. Z výsledků studie vyplývá mírně vyšší pevnost v tahu u vzorků z recyklátu, která může být dána přítomností dalších směsných polymerů, jež nebyla v článku ověřována. Hodnoty u obou typů kompozitů se však příliš neliší – kompozit z primárního polymeru dosáhl tahové pevnosti 27,2 MPa, kompozit z recyklátu 29,9 MPa.

Vliv podílu plniva a přidavku kompatibilizéru studovali také Dintcheva a Mantia [34], s. 608-614]. Ve své studii srovnávali účinek plnění lehké frakce odpadního směsného polymeru 20 a 40 %hm. dřevními vlákny připravenými z termomechanické buničiny z měkkého dřeva. Z následujícího grafu (Graf 13) lze odvodit, že navzdory předpokladům tahová pevnost při vyšším plnění poklesla, a to i při použití kompatibilizéru. Nejlepšího chování pod tahovým zatížením dosáhla zkušební tělesa s 2% přidavkem kompatibilizéru (zejména PP/MA). Významný rozdíl v chování kompozitu při tahovém zatížení byl zaznamenán u modulu pružnosti, kde je zřejmý přenos napětí vlákny výrazněji se projevující u kompatibilizovaných směsí s vyšším podílem plniva.



Graf 13 Srovnání tahové pevnosti (nahore) a modulu pružnosti (dole) u neplněné lehké frakce odpadního polymeru (LF) a připravených zkušebních těles z kompozitů o 20 a 40 %hm. plnění při různém dávkování kompatibilizéru (PP/AA nebo PP/MA). [34], s. 611]

Kromě tahové pevnosti byl v daném výzkumu [34], s. 608-614] testován také vliv plnění polymerní matrice ze směsi odpadního polyetylénu a polypropylénu s ohledem na poměrné prodloužení v tahu, houževnatost a kríповé charakteristiky, tedy pevnost v tahu při zatížení zvýšenou teplotou. Vyhodnocení těchto charakteristik uvádí následující grafy (Graf 14).

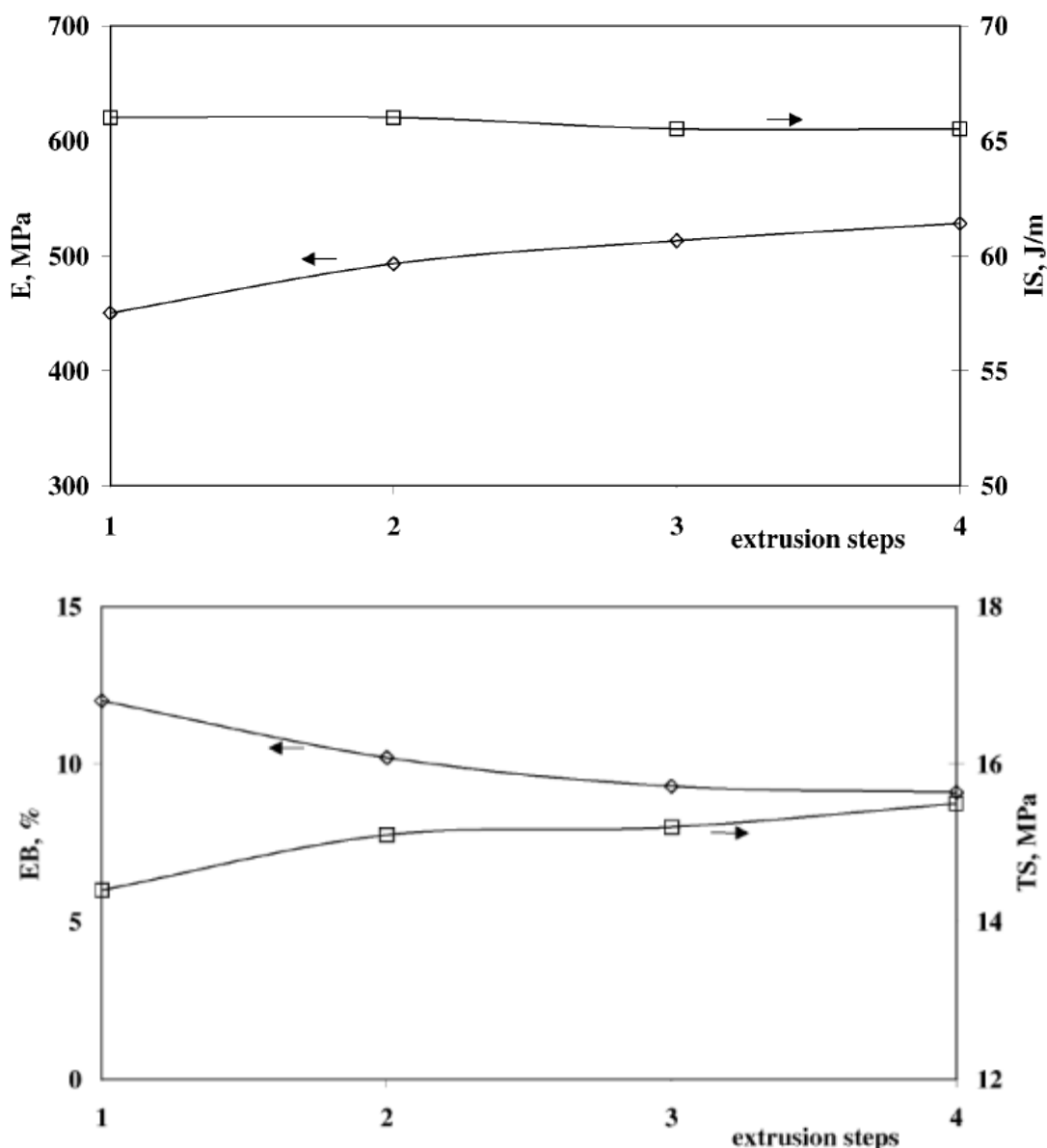


Graf 14 Protahzení (nahore) a rázová houževnatost (dole) testovaných zkušebních těles z neplněného směsného odpadního polyetylenu a polypropylenu a kompozitů při různém plnění dřevními vlákny a míře kompatibilizace při porušení tahem. [34], s. 611-612]

Poměrné prodloužení zkušebních těles v daném výzkumu [34], s. 608-614] odpovídá předpokladům plnění dřevními vlákny. Nejvyšší tažnost byla zaznamenána u neplněného polymeru a postupně klesala s narůstajícím obsahem vláknitého plniva. Vliv přidavku kompatibilizační přísady na tažnost zkušebních těles lze interpretovat různým konečným množstvím polymeru v matrici. Zatímco u 2% přidavku se kompatibilita matrice a plniva zvýšila pouze mírně a zajistila lepší přenos napětí do vláknové výztuže, u 5% přidavku již dochází ke zvýšení tažnosti v porovnání s nekompatibilizovaným kompozitem. Plnění

směsného odpadního polyetylenu a polypropylenu vláknovou výztuží mělo výrazný vliv na houževnatost, která prudce poklesla (přibližně o 25-30 %) u všech typů směsí.

Obdobný kolektiv autorů [35], s. 552-560] provedl studii mechanických vlastností dřevoplastového kompozitu s matricí z lehké frakce (tedy z odpadního polyetylenu a polypropylenu, těžká frakce obvykle obsahuje PET, PS a PVC) odpadní směsi polymerů při různém procesu zpracování. Zpracování bylo realizováno extruzí v 1, 2, 3 a 4 krocích. Vliv několikanásobné extruze byl testován na samotné matrici, na následujících grafech je uveden impakt na tahovou pevnost, modul pružnosti, rázovou houževnatost a protažení (Graf 15).



Graf 15 Vliv několikanásobné extruze na modul pružnosti v tahu, rázovou houževnatost (nahore) a poměrné prodloužení při porušení a tahovou pevnost (dole). [35], s. 554-555]

Několikanásobné zpracování je u odpadních polymerů běžné, jelikož prochází při recyklaci druhým výrobním procesem směřujícím k výrobě nového produktu. Studium změn,

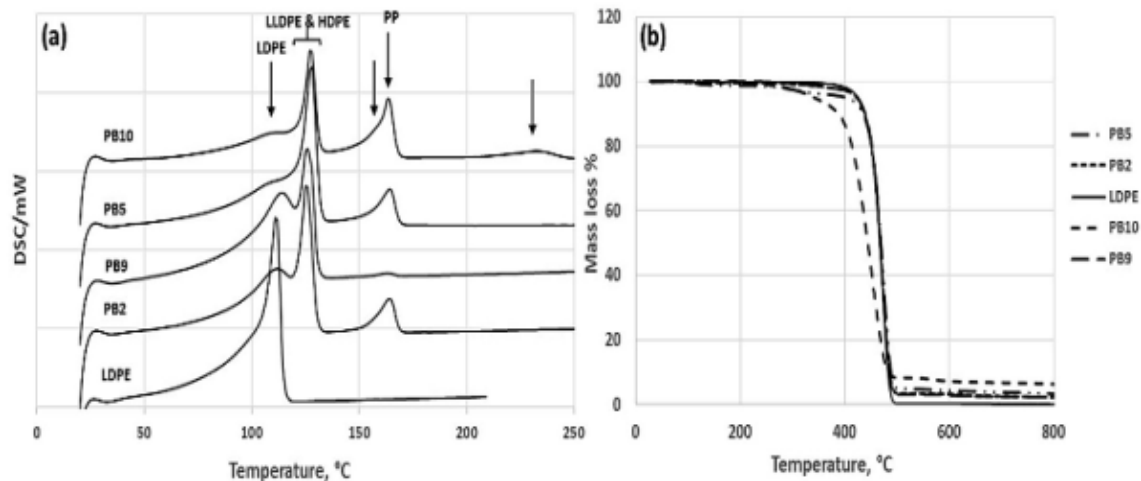
ke kterým dochází při opakovaném zpracování recyklátu, je tedy důležitou součástí rozhodování o jeho uplatnění. Jak je patrné z uvedených grafů (Graf 15), několikanásobné zpracování polymeru ovlivňuje zejména pevnostní charakteristiky – modul pružnosti mírně vzrostl, stejně jako tahová pevnost. Pokles tahové pevnosti se projevil v narůstajícím poměrném prodloužení, což může být důsledek narušení chemické struktury polymeru, kdy došlo k dalšímu síťování a tedy k přiblížení makromolekul. Tomuto jevu odpovídá tak zvýšená rázová houževnatost materiálu.

2.1.2 Chemické složení matrice

Chemické složení matrice je u odpadních polymerů nutné stanovit zejména s ohledem na možné kontaminanty, kterými mohou být jednak anorganické látky, mnohem častěji však rezidua jiných polymerů, jež se mohou do recyklátu (resp. regranulátu) matrice dostat nevhodnou metodou nebo nedostatečnou separací, případně z dalších zdrojů v průběhu zpracování. Přítomnost takovýchto reziduí ve vyšší míře může způsobit především obtížnější homogenizaci kompozitu a nižší celkovou kvalitu produktu způsobenou nerovnoměrnou teplotou tání polymerní směsi. Pokud recyklát / regranulát obsahuje příměs polymeru s vyšší (případně nižší) teplotou tání, může se to negativním způsobem projevit na jeho reologických vlastnostech a implicitně i na chování konečného produktu při mechanickém nebo environmentálním zatížení, jelikož je pak velmi pravděpodobný rozvoj napětí na styku vláken plniva a matrice. Matrici připravenou z odpadního polymeru lze z hlediska chemické struktury posoudit několika evaluačními nástroji. Nejčastěji se v tomto případě využívá termická analýza a infračervená absorpční spektroskopie.

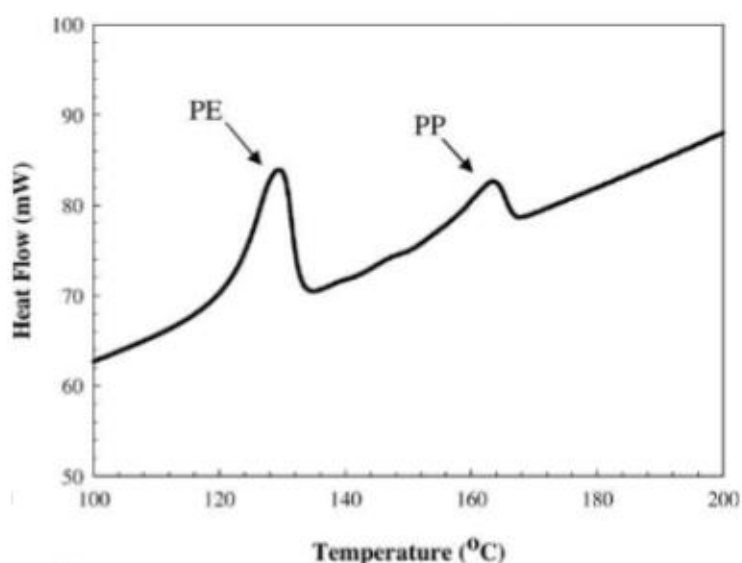
Thurku a kol. [27], s. 473-474] ve své studii provedli posouzení prostřednictvím termické analýzy (DSC) a infračervené spektroskopie (FTIR). Prostřednictvím těchto metod bylo stanoveno konkrétní složení směsných polymerů s ohledem na orientační teplotu tání T_m a křivku FTIR spektrogramu. Autoři realizovali termickou analýzu jen u některých vybraných vzorků, u nichž se lišil způsob přípravy termoplastové matrice (separace plastového odpadu). Výsledky termické analýzy jsou uvedeny v následujícím grafu (Graf 16). Z vyhodnocení DSC jsou patrné hodnoty T_m vyskytující se jak u nízkohustotního, tak u lineárního nízkohustotního a vysokohustotního polyetylenu, a u polypropylenu (hodnoty 114, 129 a 165 °C). Odpadní polymery ze zboží pro domácnosti často obsahují rezidua dalších špatně separovatelných plastů, jako jsou polystyren, polyetylen tereftalát nebo polyvinylchlorid, které jsou charakteristické vyšším bodem tání a rozkladu. Ty mohou vést k nehomogenitě konečného směsného polymeru. U testovaných vzorků se tato rezidua objevila pouze u jedné směsi

(PB₁₀), která se obecně vyznačovala nižšími pevnostními charakteristikami. Infračervená absorpční spektroskopie však u žádného zkušebního tělesa spektrální pásy těchto reziduí nezaznamenala, jednalo se tedy o obsah řádově do 5 %.



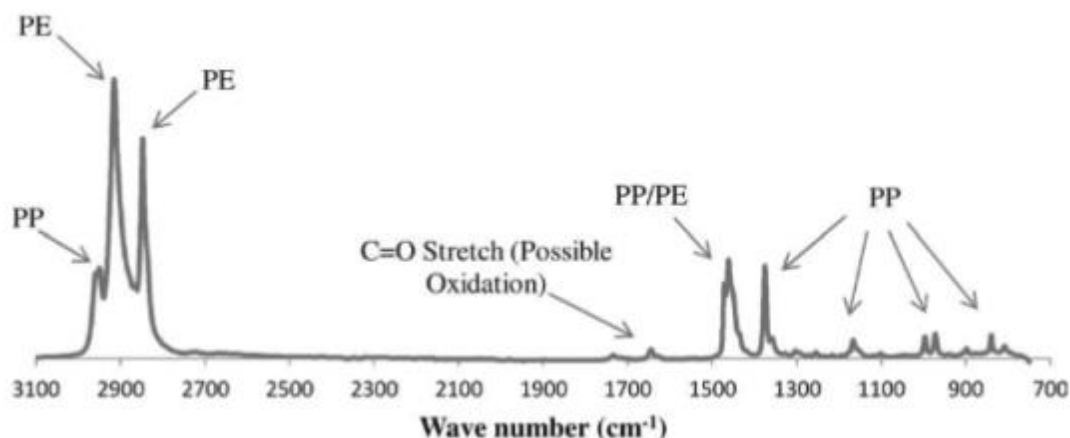
Graf 16 Termická analýza vzorků použitých polymerních směsí – nízkohustotního polyetylenu a odpadních směsí polyetylenu a polypropylenu – prostřednictvím DSC a ztráty hmotnosti při zvyšující se teplotě. [27], s. 474]

Studiem chemické struktury a procesních vlastností polymerního recyklátu se zabývali také Kazemi a kol. [31], s. 487-488]. Na vzorcích směsného odpadního polyetylenu a polypropylenu provedli termickou analýzu a infračervenou absorpční spektroskopii. Výsledky DSC uvádí následující Graf 17. Obdobně jako u předchozího výzkumu Thurku a kol. [27], s. 473-474], i Kazemi a kol. identifikovali základní pásy polyetylenu na přibližně 130 °C a polypropylenu na přibližně 165 °C.



Graf 17 Termická analýza vzorků polymerní směsi odpadního polyetylenu a polypropylenu. [31], s. 488]

Kromě termické analýzy hodnotili autoři Kazemi a kol. [31], s. 488] své vzorky prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie. Naměřené spektrum uvádí následující Spektrogram 2. Na spektrogramu jsou patrné spektrální pásy v oblasti valenčních vibrací polymerů, které jsou typické pro polyetylen a polypropylen – široký pás na vlnočtu 2800-3000 cm^{-1} . V oblasti otisku palce (*fingerprint region* vyskytující se na vlnočtech 400-1500 cm^{-1}) jsou pak zaznamenány odpovídající deformační vibrace obou odpadních polymerů.



Spektrogram 2 Naměřené spektrum směsi odpadního polyethylénu a polypropylénu. [31/, s. 488]

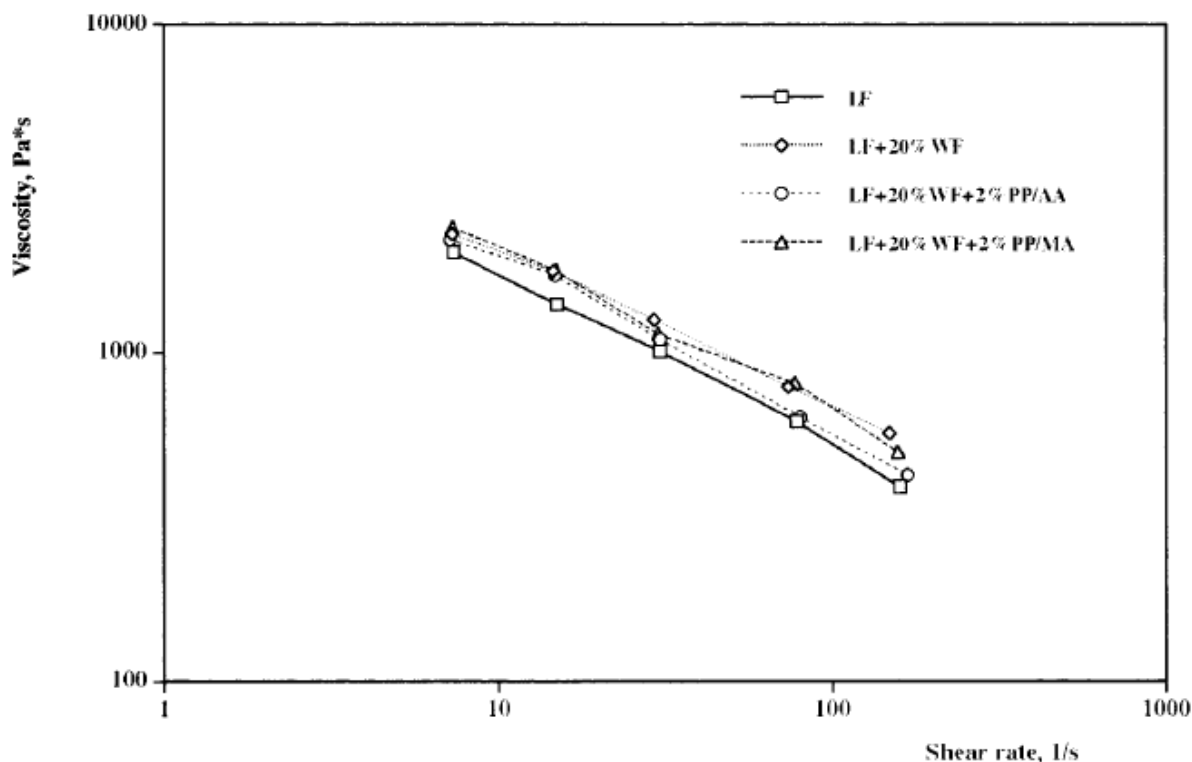
Komplexní studii materiálových vlastností matrice z odpadního provedli ve svém výzkumu Dintcheva a Mantia [34], s. 608-610]. Separace odpadního polymeru byla v jejich případě rovněž uskutečněna flotací, před vlastním zpracováním na druhotnou surovinu byl proveden rozbor chemického složení prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie, jíž byl identifikován charakter směsi obsahující přibližně 80 %hm. polyethylénu a 20 %hm. polypropylénu. Přítomnost reziduí a nečistot dalších odpadních polymerů byla stanovena rentgenovou fluorescenční spektroskopií (XRF).

Přítomnost reziduí v polymerním recyklátu může ovlivnit jeho konečné chování pod zatížením, ale také odolnost vůči působení dalších faktorů. Sledování jejich přítomnosti je tak nezbytnou součástí hodnocení vlastností dřevoplastového kompozitu zejména s ohledem na jeho chemickou strukturu.

2.1.3 Reologie a termické vlastnosti

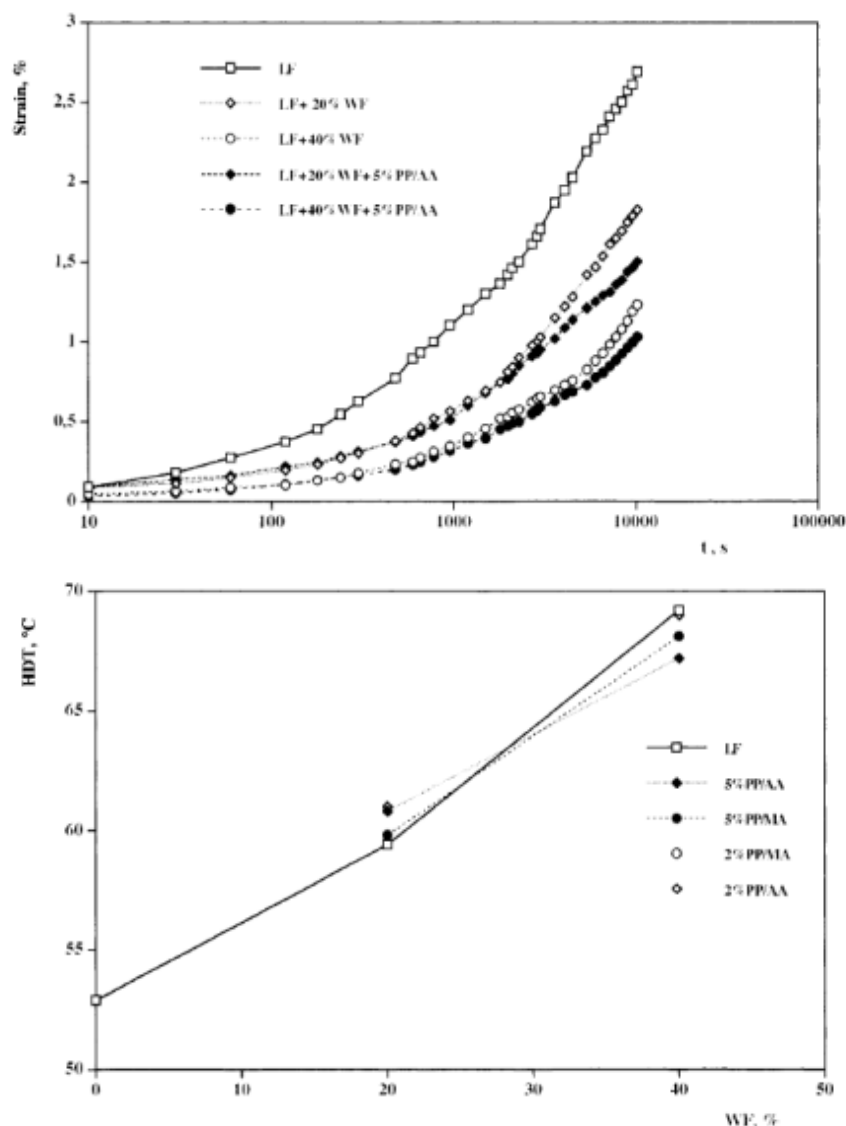
Dintcheva a Mantia [34], s. 608-614] se ve svém výzkumu vedle vlivu plnění směsi odpadních polymerů dřevitou vláknovou výztuží zabývali také reologií směsí, kríčovými vlastnostmi a deformací při zatížení teplotou, které byly stanoveny prostřednictvím Ceast zařízení s intendantním nástrojem, které bylo využito pro stanovení houževnatosti. Reologie

směsí byla měřena prostřednictvím reoskopu, který umožňuje stanovení viskozity při různém tlaku taveniny. Viskozita taveniny byla u neplněného směsného polymeru přibližně shodná jako u polymerní směsi s 20 % plnění (viz Graf 18).



Graf 18 Tokové křivky směsí z odpadního směsného polyetylenu a polypropylénu neplněného (LF) a kompozitů při různém plnění dřevitou výztuží a míře kompatibilizace. [34/, s. 613]

Termické vlastnosti byly v daném výzkumu Dintcheva a Mantia [34], s. 608-614] odvozeny od studia krípkového chování při ohybu a HDT. HDT, tedy teplota, při níž dosáhne kompozit stanovené ohybové deformace, byla u kompozitů se 40% plněním mnohem vyšší (přibližně o 10 °C), u všech zkušebních těles kromě neplněného plastu, u nějž se HDT pohybovalo přibližně mezi 60 a 70 °C. Na základě takto určené teploty, při níž dochází ke ztrátě tuhosti, byla následně zvolena teplota pro stanovení krípkového chování. Jak je patrné z výsledného grafu (Graf 19 nahoře), nejmenšího průhybu a tedy největší tuhosti při teplotě 60 °C dosáhla zkušební tělesa se 40 % plněním. Tímto způsobem byl potvrzen také vliv přídavku kompatibilizéru (5 % PP/AA).



Graf 19 Krípkové křivky při 60 °C (nahore) a HDT (dole) zkušebních těles z neplněného směsného odpadního polyetylenu a polypropylénu a kompozitů při různém plnění dřevními vlákny a míře kompatibilizace. [34], s. 613]

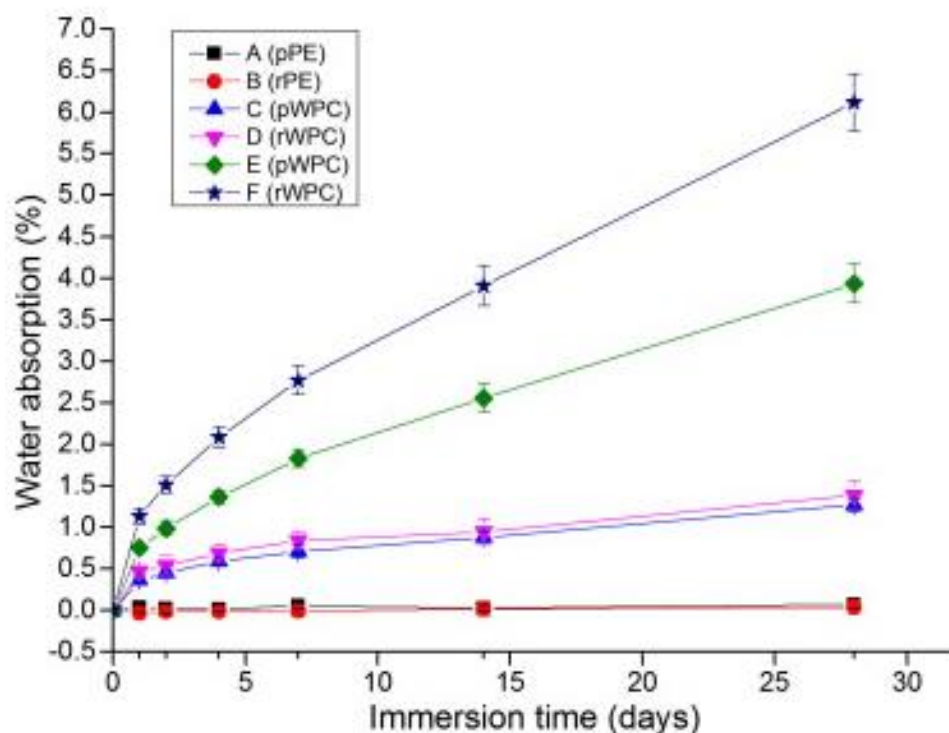
2.1.4 Nasákavost, bobtnání a rozměrová stabilita

Nasákavost a bobtnání je spojeno s adhezí matrice na povrchu plniva a celkovým charakterem jejich interakce na rozhraní jeho zrn. Thurke a kol. [27], s. 475] zaznamenali nejvyšších hodnot nasákavosti u zkušebních těles s horší strukturou, která byla potvrzena SEM snímky, což odpovídá stanovenému předpokladu. Čím horší je adheze matrice a čím vyšší je pórovitost struktury kompozitu, tím je průnik vlhkosti k hydrofilním vláknům snadnější a nasákavost vyšší.

Adhikary a kol. [30], s. 807-815] se ve své studii rovněž zabývali rozměrovou stálostí dřevoplastového kompozitu z odpadního polyetylenu srovnáním s referenčním kompozitem z primárního polymeru o stejném složení, a to s ohledem na přidavek kompatibilizéru a podíl

matrice v surovinovém složení. Zvyšující se množství hydrofilního plniva výrazně zvyšuje nasákavost vzorků, které byla stanovena po 2 a 24 hodinách. Přídavkem kompatibilizéru však lze snížit nasákavost až na úroveň snížení podílu plniva o 25 % – vzorky s recyklátem a 3 % anhydridového kompatibilizéru dosáhly hodnoty bobtnání 0,51 %, vzorky stejného složení bez kompatibilizéru 1,51 % a vzorky s vyšším podílem matrice (o 25 % méně plniva) 0,42 %.







Chování ve vlhkém prostředí bylo také předmětem studie, kterou provedli Sommerhuber a kol. [28], s. 80]. Rozdílné chování kompozitu připraveného z primárního a recyklovaného polymeru o 0, 30 a 60% plnění dřeví moučkou (rovněž primární nebo recyklovanou) bylo hodnoceno v návaznosti na dlouhodobé ponoření do vody a pravidelné odečítání hodnot. Celková doba ponoření vzorků činila 28 dnů. Nejvyšší nasákavosti dosáhla zkušební tělesa s vysokým podílem hydrofilní dřevní moučky, po 28 dnech činila u vzorků z primárního polymeru přibližně 3,5 %, u vzorků z recyklátu více než 6 %. U 30% plnění byla nasákavost kompozitů srovnatelná, což lze připsat přídavku kompatibilizéru. Při vyšším plnění je tedy nutné objemové množství přísady zvýšit zejména u recyklovaného polymeru.



Graf 20 Nasákavost vzorků z primárního polymeru (A – neplněný, C – s 30% plněním, E – s 60% plněním) a recyklátu (B – neplněný, D – s 30% plněním, F – s 60% plněním). [28], s. 80]

2.1.5 Vzhledové vlastnosti

Kromě fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností může ovlivnit částečná nebo celková náhrada primárního polymeru odpadním plastem také vzhledové charakteristiky kompozitu. K tomu dochází zejména v případě, že původní aplikace termoplastu, z něhož je recyklát připraven, vyžadovala specifické zabarvení, tzn. původní polymerní směs obsahovala barviva a další zbarvující aditiva, která změnila základní průsvitný vzhled materiálu. Sommerhuber a kol. [28], s. 83] provedli posouzení vzhledových vlastností připravených kompozitů v návaznosti na jejich základní barvu a míru průsvitnosti. Primární polymer byl dodán v bílé barvě, recyklát v barvě šedé. Posouzení změny barevnosti vlivem zpracování uvádí následující Obrázek 8.

Specimen	L^*	a^*	b^*	
A pPE (0/100)	96	-1	1	
B rPE (0/100)	48	-2	1	
C pWPC (30/70)	45	4	14	
D rWPC (30/70)	39	-1	5	
E pWPC (60/40)	37	-2	13	
F rWPC (60/40)	32	1	8	

Obrázek 8 Změna barevnosti zpracováním u primárního a recyklovaného polymeru a připravených kompozitů s 30 a 60% plněním dřevní moučkou. [28], s. 83]

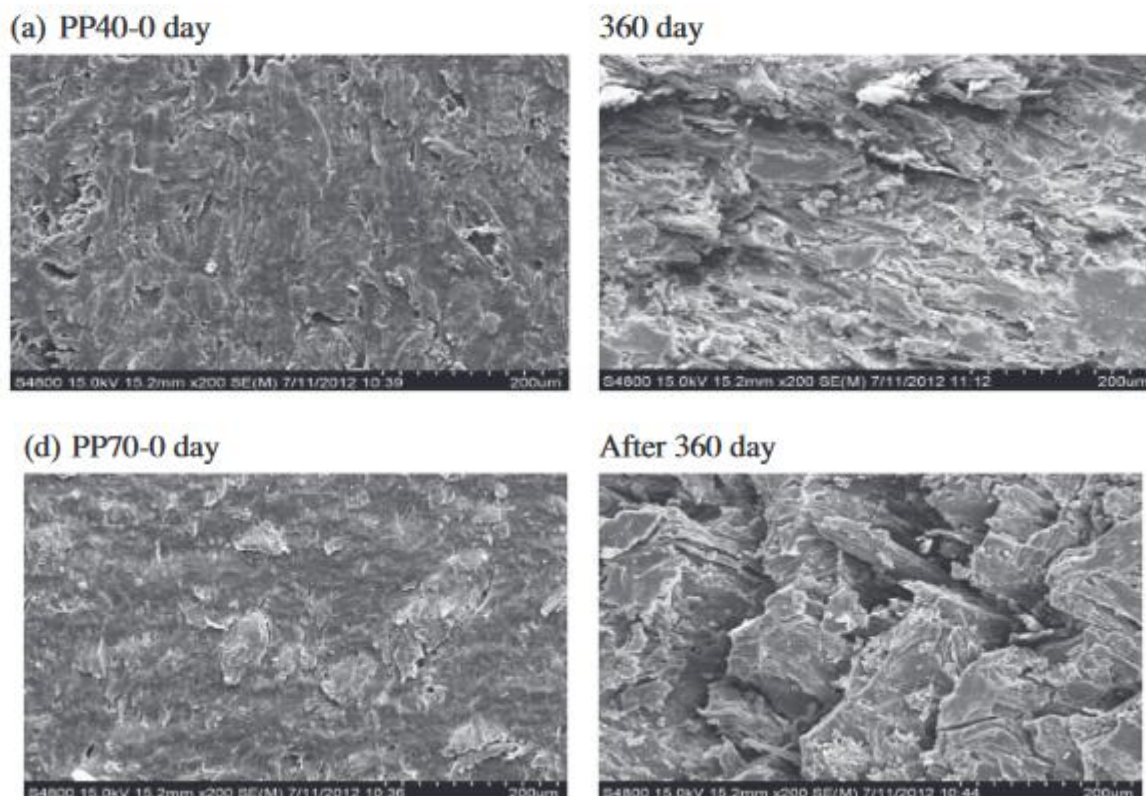
2.1.6 Zatěžování nepříznivým prostředím

Zvláštní pozornost hodnocení chování dřevoplastového kompozitu je nutné vzhledem k aplikaci v exteriéru věnovat vývoji jeho charakteristik pod cyklickým zatížením

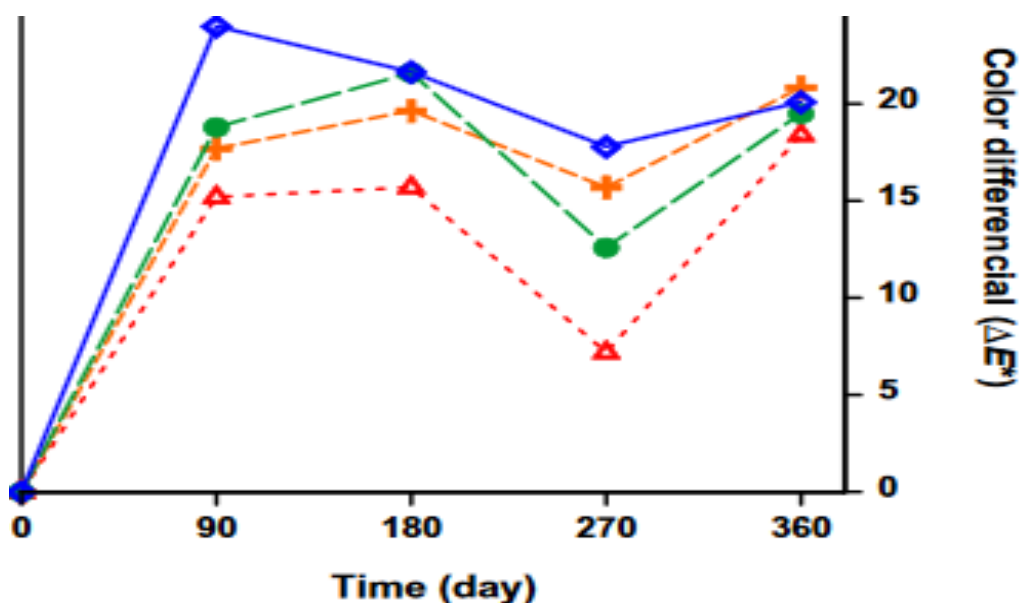
nepříznivými podmínkami. Tato oblast zájmu je spojená především s klimatickým prostředím s výraznými výkyvy teplot, vlhkosti vzduchu nebo mrazu. Testování lze provádět dlouhodobými zkouškami vystavením přímému působení okolním podmínkám, nebo zrychlenému cyklickému střídání extrémních prostředí.

Yang a kol. [36], s. 160] provedli studii dlouhodobého zatěžování přímým působením exteriérových podmínek na zkušební tělesa dřevoplastového kompozitu s maticí z recyklovaného polypropylenu. Zkušební tělesa obsahovala 30,40, 50 a 60% plnění dřevní moučkou a byl vystavena prostředí s průměrnou teplotou $23,8 \pm 4,9^\circ\text{C}$ s výkyvem maximální teploty $35,7^\circ\text{C}$ a minimální teploty $10,1^\circ\text{C}$ po dobu jednoho roku. Vzdušná vlhkost se pohybovala mezi 70 a 77 %, přičemž déšť se měsíčně vyskytoval v rozmezí 5-17 dnů. Sluneční osvit byl zvýšen montáží zkušebních těles pod úhlem 45° . Měření definovaných veličin charakterizujících vlastnosti zkušebních těles, tedy vizuální posouzení povrchových změn, změny barevnosti, karbonatace a změn chemické struktury makromolekul polymerní matrice i dřevní hmoty, fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností, bylo realizováno v odstupech 3, 6, 9 a 12 měsíců.

Výstupy zkoušek prokázaly vliv různého plnění na vlastnosti kompozitu, ovšem vzhledem ke skutečnosti, že kompozitní materiál nebyl srovnán s obdobnými vzorky kompozitu s maticí z primárního polymeru, nelze provést jednoznačné posouzení vlivu recyklátu na jeho vlastnosti. Sledované charakteristiky však mohou být vodítkem k celkovému posouzení materiálu jako takového. Změna vzhledových vlastností materiálu se po vystavení exteriérovým podmínkám po dobu 360 dnů výrazně projevila na jeho povrchu i barevnosti. Porušení povrchu znázorňují SEM snímky (pro ilustraci použity pouze snímky vzorků s nejnižším a nejvyšším plněním), které jsou na následujícím obrázku (Obrázek 9), a na nichž je patrné značné porušení kompaktnosti povrchu. Změnu barevnosti ilustruje Graf 21, nejmarkantnějších změn bylo dosaženo po 90 dnech expozice, nejvyšší hodnoty dosáhly vzorky s 60% plněním.



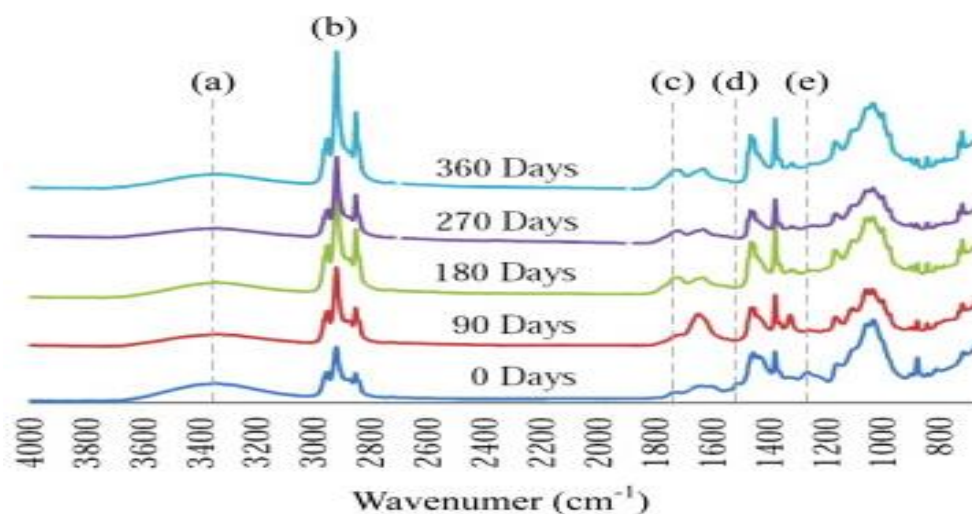
Obrázek 9 SEM snímky povrchu zkušebních těles s 60 (PP40) a 30% (PP70) plněním před vystavením exteriérovým podmínkám (vždy vlevo) a po roční expozici (vždy vpravo). [36/, s. 163]



Graf 21 Změna barevnosti u vzorků s 60% (modrá), 50% (zelená), 40% (žlutá) a 30% (červená) plněním dřevní moučkou. [36/, s. 162]

Ke změně barevnosti kompozitu dochází především fotodegradací (působením slunečního záření), které ovlivňuje jak chemickou strukturu polymeru, tak dřevního plniva. Působení tohoto faktoru se projevuje především vybělováním a šednutím dřeva. U kompozitu tak dochází k postupnému žloutnutí, které může být způsobeno dvěma typy reakcí – oxidací

ligninu ve dřevě a následným vybělováním vlivem světla. Chemická struktura polymerního recyklátu, obdobně jako struktura primárního polymeru, podléhá působení slunečního záření a projevuje se štěpením karbonylových skupin makromolekul, které tvoří volné radikály. Tento jev byl testován prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie, technikou ATR (Attenuated total reflectance – oslabení totální reflektance) na povrchu zkušebních těles. Výsledky měření uvádí následující spektrogramy (Spektrogram 3). Na nich je patrný úbytek intenzity (absorbance) spektrálních pásů odpovídajících vazbám ligninu a narůstající intenzity pásů karboxylových skupin a esterů prokazujících fotooxidaci.



Spektrogram 3 Spektrogramy zkušebních těles s 60% plnění: [36/, s. 163]

- a) hydroxylové skupiny polysacharidů – mírný pokles intenzity, b) spektrální pásy charakterizující etylové a metylové skupiny CH_2 , CH_3 – mírný nárůst intenzity – zvýšení obsahu okrajových funkčních skupin, c) pás karbonylových skupin $\text{C}=\text{O}$ – nárůst na vlnočtu 1714 cm^{-1} (karboxylové kyseliny) a 1735 cm^{-1} (estery) – prokazují fotooxidaci dřeva, d) éterové skupiny dřeva na vlnočtech 1510 a 1595 cm^{-1} – snížení intenzity, e) C-O deformační vibrace aromatických vazeb ligninu.

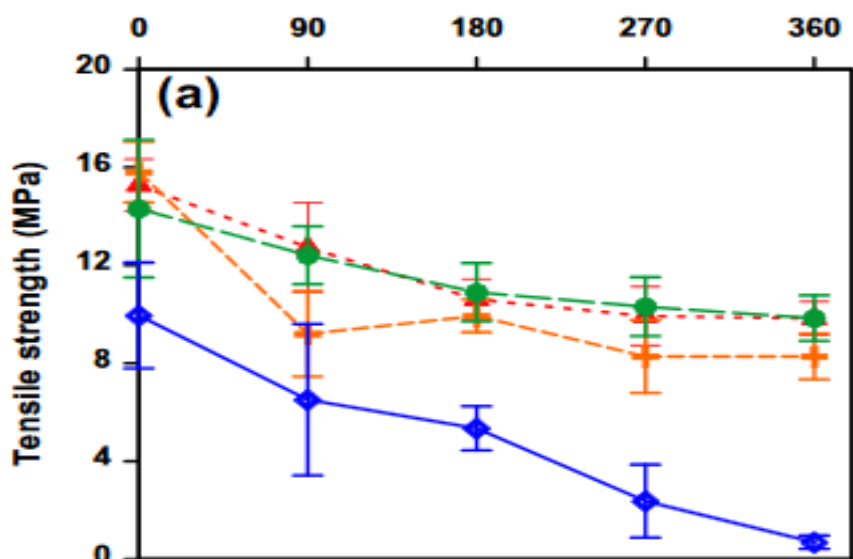
Na vlnočtu 1640 cm^{-1} je po 90 dnech expozice zaznamenán výrazný nárůst vinylových skupin, který je navázán na II typ Norrishovy fotochemické reakce. Obdobně narůstající spektrální pás na vlnočtu 1714 cm^{-1} po celou dobu expozice svědčí o probíhajícím mechanismu I typu Norrishovy reakce, jelikož indikuje přítomnost karbonylových funkčních skupin (viz Spektrogram 3).

Zatěžování exteriérovou expozicí bylo také reflektováno ve vnitřní struktuře kompozitu, která má vliv na fyzikální a fyzikálně mechanické vlastnosti materiálu. Fyzikální vlastnosti zahrnují především hustotu, absolutní vlhkost, nasákavost a bobtnání. Lze předpokládat, že vlivem změn polymerní struktury v důsledku působení slunečního záření v synergii s vlhkostí dochází k postupnému narušování materiálu především na povrchu a na styčné ploše plniva a matrice. Postupné narušování integrity kompozitu probíhá směrem od povrchu vystaveného

slunečnímu záření dovnitř. Působení vlhkosti na odhalená zrna nedostatečně obalená maticí zapříčiňuje jejich bobtnání vlivem hygroskopického charakteru dřeva a implicitně vnitřní napětí v materiálu, které dále podporuje degradaci kompozitu.

Vyhodnocení fyzikálních vlastností bylo v dané studii Yanga a kol. [36], s. 159-168] realizováno v návaznosti na pokles objemové hmotnosti, který se projevil u všech testovaných směsí obdobným trendem (po 90 dnech expozice došlo k mírnému nárůstu a poté k opětovnému poklesu, pouze u směsi s 60% plněním se pokles projevil výrazněji pravděpodobně vlivem vysokého bobtnání). Vlhkost všech směsí v průběhu expozice rovněž dosáhla obdobného trendu u všech směsí, tzn. výrazný nárůst v prvních 90 dnech, poté stabilizace. Směsi s vyšším plněním (50 a 60 %) vykazaly další nárůst po 270 dnech expozice, který lze připsat podstatnějšímu narušení struktury vlivem bobtnání, a také vyššímu podílu složky (dřeva) s hygroskopickým charakterem. Nejvyšší nasákavosti i bobtnání dosáhla dle předpokladu směs s nejvyšším podílem plniva.

Vliv expozice na mechanické vlastnosti ilustruje následující Graf 22, na němž je patrný postupný pokles tahové pevnosti projevující se nejvýrazněji u směsi obsahující maximální 60% plnění. Tuto skutečnost lze kromě vyššího podílu dřevního plniva připsat také nízkému obsahu kompatibilizéru, který výrazně ovlivňuje kompaktnost struktury kompozitu a přilnavost jednotlivých fází na rozhraní matrice / plnivo.

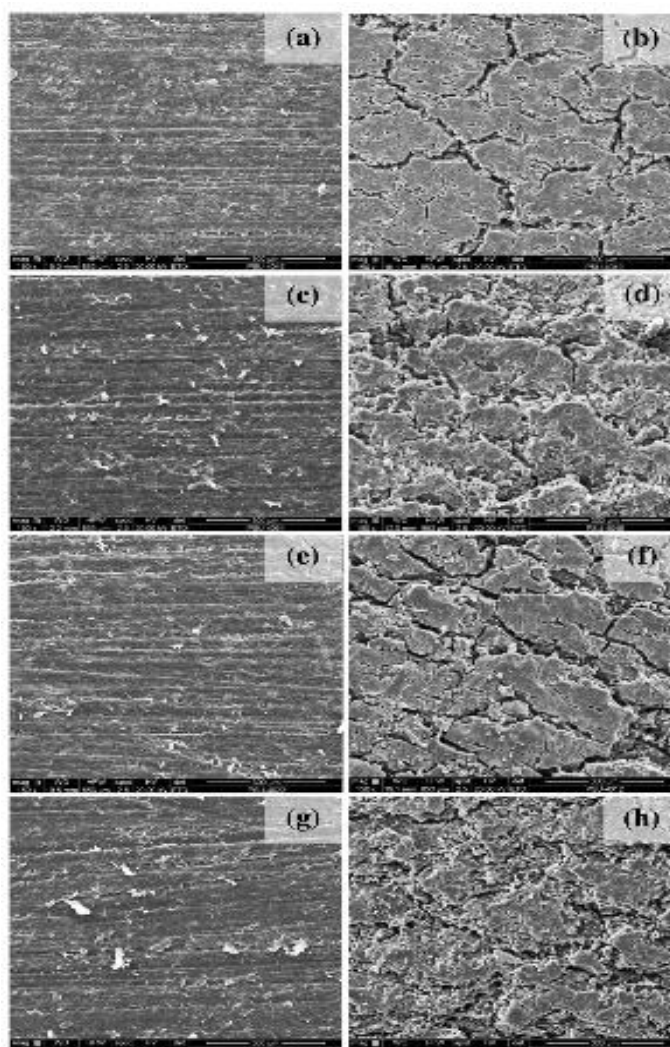


Graf 22 Tahová pevnost u vzorků z recyklovaného polypropylenu s 60% (modrá), 50% (zelená), 40% (žlutá) a 30% (červená) plněním dřevní moučkou. [36], s. 165]

Přímé testování vystavení dřevoplastového kompozitu s maticí z recyklovaného polypropylenu nepříznivému prostředí exteriéru realizovali ve své studii Homkhiew a kol. [37], s. 52-59]. Hodnocení bylo zaměřeno na směsi obsahující 25; 35,3 a 45% plnění. Směsi

byly dále vylepšeny aditivy – 0,5-1 % UV stabilizátoru, 3 % maleinanhydridového kompatibilizéru a 1 % lubrikantu. Expozice přirozenému exteriéru (Thajsko) trvala 1 rok v úhlu 45° směrem k jihu, zkušební tělesa byla testována s ohledem na vybrané charakteristiky po 60, 120, 180, 240, 300 a 360 dnech. Hodnocení se zaměřovalo na vizuální posouzení a fyzikálně mechanické vlastnosti kompozitů včetně tvrdosti povrchu.

Porušení povrchové integrity je uvedeno na následujících SEM snímcích (Obrázek 10). Jak je patrné z uvedených snímků, porušení povrchové integrity kompozitu dosáhlo obdobného stupně jak u vzorků z primárního, tak z recyklovaného polypropylenu. U vzorků z recyklovaného polymeru byla ovšem míra znatelně vyšší. Dle předpokladu, vzorky s vyšším podílem plniva (snímky d) a h)) se vyznačovaly větší mírou povrchového porušení než vzorky s nižším podílem plniva (25 %).

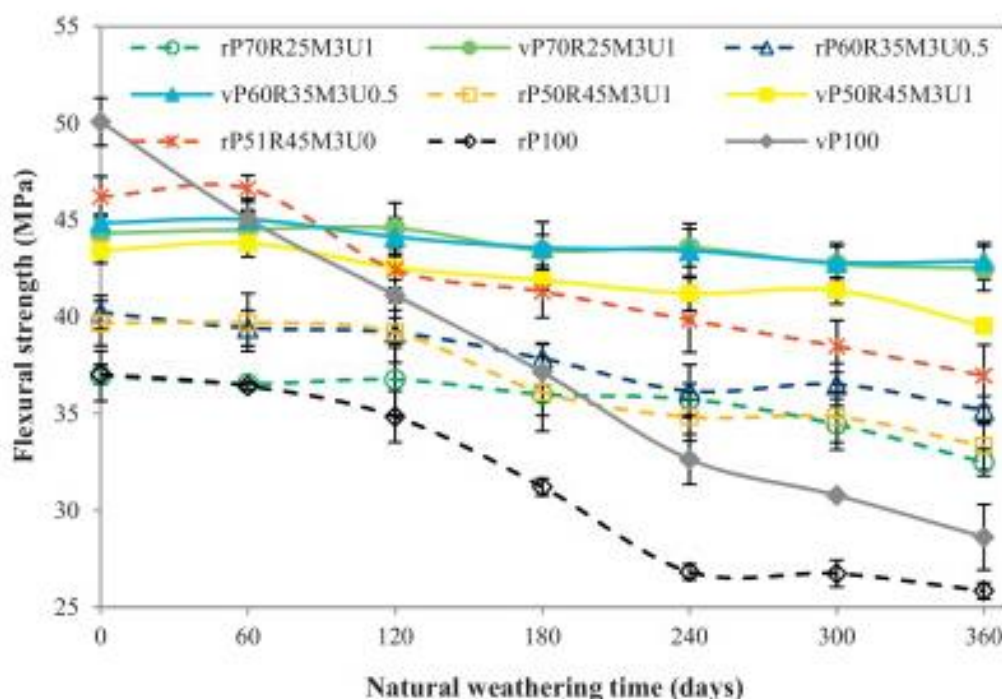


Obrázek 10 SEM snímky povrchu kompozitu před (vlevo) a po 360 dnech (vpravo) vystavení exteriéru:

[37], s. 56]

a), b) – primární polypropylen s 25% plněním, c), d) – primární polypropylen s 45% plněním, e), f) – recyklovaný polypropylen s 25% plněním, g), h) – recyklovaný polymer s 45% plněním.

Studie [37], s. 52-59] hodnotila také chování při zatížení tříbodovým ohybem. Vyhodnocení testování je uvedeno na navazujícím grafu (Graf 23) a poukazuje na vyšší ohybové pevnosti u všech vzorků z primárního polymeru bez ohledu na míru plnění. Zkušební tělesa z primárního polymeru dosáhla v průběhu celé expozice stabilní ohybové pevnosti, jejíž pokles se projevil pouze nepatrně, ve výraznější míře u vzorků s nejvyšší hodnotou plnění. Nejblíže hodnotám počáteční ohybové pevnosti kompozitů s maticí z primárního polymeru byly vzorky kompozitu z recyklátu se 45% plněním bez UV stabilizátoru (tedy s vyšším podílem matrice). U zkušebních těles s nižší hodnotou plnění byly počáteční hodnoty ohybové pevnosti přibližně o 25 % nižší a vykázaly větší míru poklesu na konci expozice. Rozdíl ohybové pevnosti je znatelný také u neplněných polymerů, mnohem výrazněji se projevil u primárního polypropylenu.

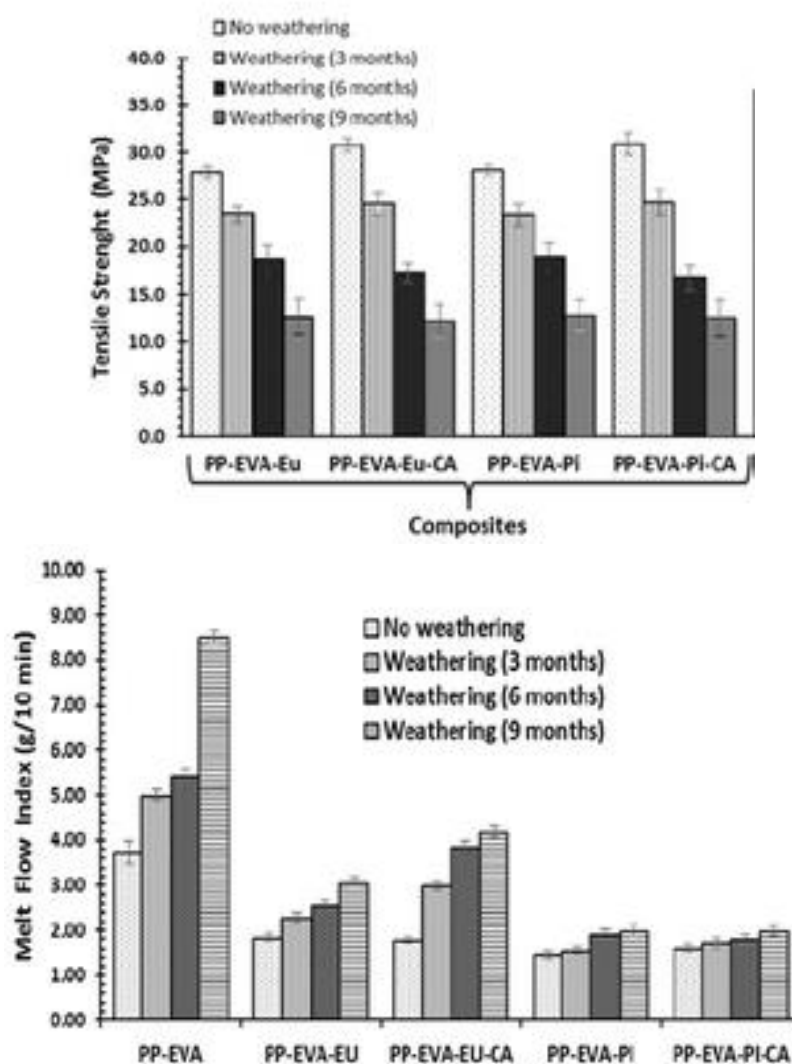


Graf 23 Pevnost v ohybu u vzorků z primárního polypropylenu (vPP) a recyklovaného polypropylenu (rPP) s 25% (R25) 35,3% (R35) a 45% (R45) plněním dřevní moučkou. [37], s. 57]

Studii vlivu abiotické degradace na vlastnosti dřevoplastového kompozitu s maticí z recyklovaného obalového zboží provedli Catto a kol. [38], s. 321-329]. Jednalo se o degradaci dřevoplastového kompozitu s maticí ze směsi odpadního polypropylenu a kopolymeru etylen-vinyl acetát (EVA) při vystavení exteriéru. Obdobně jako v předchozích studiích bylo provedeno vystavení exteriéru při sklonu vzorků v úhlu 45°, tentokrát obrácených na severní stranu, po dobu 9 měsíců, přičemž odečítání hodnot bylo realizováno po 3, 6 a 9 měsících. Srovnáván byl vliv typ dřevního plniva a přídavku kompatibilizéru do

směsi s 30% v množství 3 %. Kromě vlivu na tahovou pevnost a na zbarvení by v této studii prokázán také vliv na reologické vlastnosti.

Tahová pevnost zkušebních těles připravených v této studii [38], s. 321-329] vykazala obdobný pokles bez ohledu na typ plniva či přítomnost kompatibilizéru, pouze počáteční pevnosti (před expozicí), byly mírně odlišné. Index toku taveniny dosáhl postupného nárůstu u všech směsí. Tento jev je připisován štěpení makromolekul vlivem působení UV záření. Kratší makromolekuly se obvykle vyznačují vyšší hodnotou indexu toku taveniny. Výstupy měření ilustruje následující Graf 24.



Graf 24 Pevnost v tahu (nahore) a index toku taveniny (dole) u vzorků směsi odpadního polypropylenu a polyetylen vinyl acetátu vstavených exteriéru [38], s. 326-327].

2.1.7 Modifikace matrice - shrnutí

Modifikace matrice dřevoplastového kompozitu odpadními polymery ovlivňuje vlastnosti materiálu zejména v návaznosti na počet stupňů recyklace, kterými polymer prošel, a míru

reziduí cizorodých látek, nečistot nebo zbytkových aditiv, které obsahuje. Několikanásobné zpracování, které je spojeno s procesem recyklace, zapříčiňuje změny v makromolekulové struktuře polymeru, které ovlivňují jeho vlastnosti. Vzhledem k běžným metodám recyklace je navíc obvykle výstupem směsný polymer, nejčastěji ve složení HDPE / PP v různém poměru v závislosti na zdrojovém odpadu. Rozdíly v chování dřevoplastového kompozitu s matricí modifikovanou odpadním polymerem se projevují v několika oblastech, nebývají však výrazného charakteru.

V oblasti morfologie a mechanických vlastností dosahují kompozity obdobných hodnot, ať už jsou vyrobeny z primárního nebo recyklovaného polymeru. Výrazný vliv lze v tomto směru připsat různým způsobům zpracování, které zapříčiňují variabilitu hodnot. Obecně dosahují lepších hodnot fyzikálních i fyzikálně mechanických vlastností kompozitní produkty vyrobené injekčním vstříkáním, jelikož vykazují větší kompaktnost a integritu povrchu. K poklesu dochází zejména v případě, že odpadní materiál prošel několikanásobnou recyklací, která oslabuje jeho schopnost tvořit dlouhé řetězce makromolekul. Jednoznačný přínos má v této oblasti použití kompatibilizéru, který zvyšuje přilnavost na rozhraní obou fází (matrice a plniva).

Z hlediska chemického složení ovlivňuje možnosti aplikace recyklované matrice zejména přítomnost nečistot, reziduí polymerů jiné rodiny nebo kontaminantů. Pokud je přítomnost těchto látek vyšší než 5 %, je jeho použití vzhledem k impaktu na konečné vlastnosti produktu diskutabilní. Z tohoto důvodu je nutné každou šarži používaného recyklátu (regranulátu) pro matrici kompozitu podrobit testování chemického složení.

Fyzikální vlastnosti kompozitu ovlivňuje především podíl dřevní hmoty. Při krátkodobém působení vlhkosti není rozdíl v hodnotách kompozitů z primárního nebo recyklovaného polymeru markantní, zvyšuje se s dobou imerze. Vodní uložení ovlivňuje také vzhledové vlastnosti kompozitu, ty jsou však primárně závislé na původním vzhledu materiálu pro polymerní matrici.

Významné rozdíly v použití recyklovaného polymeru jako matrice dřevoplastového kompozitu lze předpokládat až v jeho konečné exteriérové aplikaci. Synergické působení UV záření (slunečního osvětlení), vlhkosti a dalších faktorů (znečištění, mráz apod.) způsobuje postupné narušování integrity povrchu kompozitu a v návaznosti na Norrishovy reakce, které ovlivňují strukturu matrice, urychlují destrukci materiálu. Pro dosažení maximální životnosti kompozitu z recyklovaného polymeru je tak nutné, aby síťování makromolekul vytvořilo co nejdelší řetězce. Pokud však recyklát prošel několikanásobným procesem recyklace, lze

předpokládat, že makromolekulová struktura matrice kompozitu bude obsahovat spíše kratší řetězce, které budou rychleji podléhat štěpení a tvorbě karbonylových a vinylových skupin, tudíž celková životnost kompozitu bude mnohem nižší.

2.2 Modifikace plniva

Plnivo je kostrou dřevoplastového kompozitu přenášející a koncentrující napětí působící na produkt vyrobený z tohoto materiálu. V nemodifikovaném dřevoplastovém kompozitu má plnivo vláknový charakter o spojitém spektru zrnitosti. Modifikaci plniva dřevoplastového kompozitu lze provést několika způsoby, vždy s ohledem na konečné požadované vlastnosti aplikace produktu. Základní modifikaci plniva lze realizovat přidavkem dřevní moučky vyrobené z odpadního (poškozeného) dřeva, které nemá výrazné uplatnění v masivní formě. Kromě přidavku poškozeného dřeva lze dřevoplastový kompozit vyrobit také z pazdeří a zpracovaného rostlinného odpadu ze zemědělství.

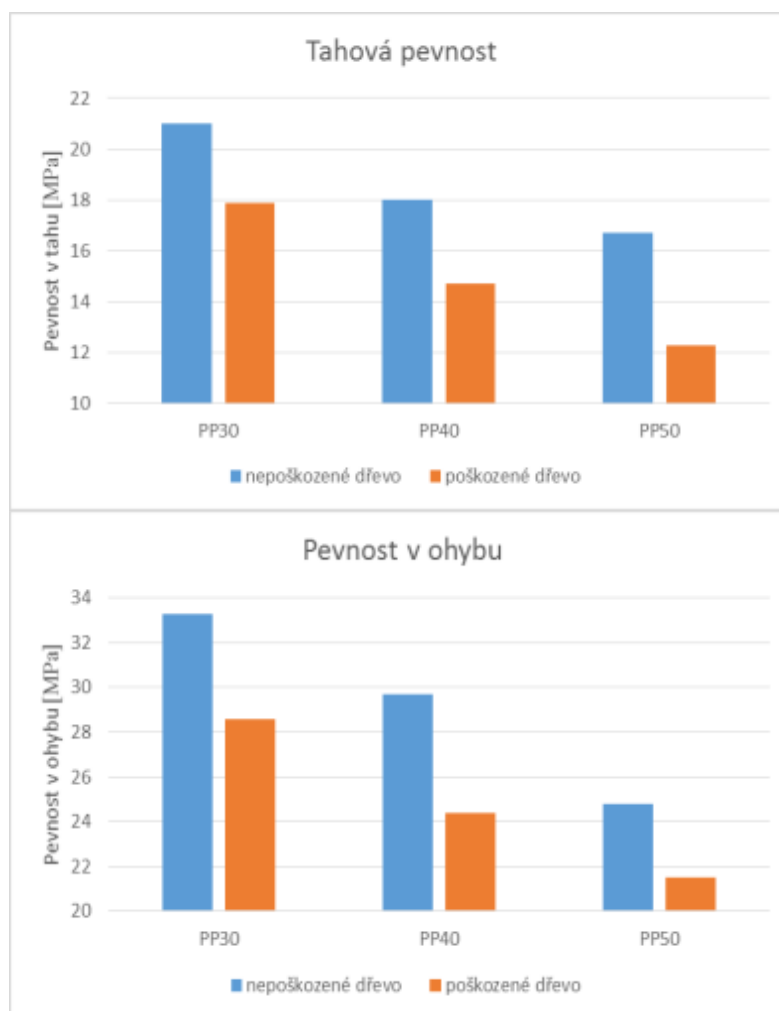
Zvláštní skupinu příměsí pro modifikaci dřevoplastového kompozitu tvoří částicové plnivo anorganického původu. Jeho přidavek do směsi může, stejně jako vláknité plnivo organického původu, změnit některé charakteristické vlastnosti kompozitu. Obvykle se jedná o zvýšení tuhosti nebo povrchové tvrdosti. Možnosti modifikace plniva a jejich vliv na vlastnosti dřevoplastového kompozitu jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

2.2.1 Použití poškozeného a odpadního dřeva

Potenciální využití poškozeného odpadního dřeva jako plniva dřevoplastového kompozitu studovali Ayrimis a kol. [39], s. 279-284]. V rámci studie byly srovnávány fyzikálně mechanické vlastnosti dřevoplastového kompozitu vyrobeného z dřevní moučky z nepoškozené borovice a borovice poškozené hnědým tlením ze stejné lokality. Dřevo poškozené hnědým tlením nedosahuje dostatečné pevnosti, nelze jej tedy použít jako surovinu pro plnění termosetů (dřevotřískové desky, OSB desky apod.). Vzhledem k nutnosti rozmělnit masivní dřevo na jemné částice dřevní moučky nese porušené dřevo významný potenciál pro výrobu dřevoplastového kompozitu.

Srovnání rozdílů v kvalitě dřevoplastového kompozitu připraveného z nepoškozeného a poškozeného dřeva bylo v realizované studii [39], s. 279-284] provedeno v závislosti na mechanických vlastnostech kompozitů s různým podílem plniva – 30, 40 a 50 %. Matrice kompozitů byla polypropylénová obohacená maleinanhydridovým kompatibilizérem o 3% podílu. Výstupy provedených zkoušek ilustruje následující Graf 25. Jak je zřejmé z uvedených hodnot, porušení struktury dřeva hnědým tlením výrazně ovlivňuje konečné

pevnosti kompozitu, a to zejména z toho důvodu, že vláknové plnivo přenáší převážnou část zatížení. Navíc 3% obsah kompatibilizéru je vhodný pro 30 % plnění, jak bylo prokázáno např. ve studii Yanga a kol. [36], s. 159-168]. Pro vyšší hodnoty plnění (50 a více %) je nutné zvýšit přísadek kompatibilizéru, aby byla zajištěna dostatečná adheze na styku plniva a matrice.



Graf 25 Tahová a ohybová pevnost vzorků připravených z polypropylenové matrice a dřevní moučky z nepoškozeného dřeva a dřeva poškozeného hnědým tlením při plnění 30, 40 a 50 %, upraveno dle [39], s. 281]

Vedle porušeného dřeva lze k výrobě dřevoplastového kompozitu použít také dřevní moučku vyrobenou z dřeva odpadního. Tímto směrem se zaměřovala studie, kterou realizovali Migneault a kol. [40], s. 241-261]. V rámci této studie bylo provedeno posouzení potenciálu využití odpadu z výroby OSB a MDI desek, dále LVL a odpadu z papírenské výroby. Zkušební tělesa byla připravena z matrice z vysokohustotního polyetylenu, obsahovala 3% podíl maleinanhydridového kompatibilizéru a plněna z 20, 30 a 40 % třemi typy dřevní moučky, 2 typy rozmělněné kůry a druhotnými surovinami z papírenského

průmyslu. Vyrobené kompozity byly testovány s ohledem na fyzikální a fyzikálně mechanické vlastnosti.

Nasákavost zkušebních těles byla v tomto případě ovlivněna charakterem vláken. Plnivo připravené z odpadu z výroby desek, které obsahuje rezidua hydrofobních pojiv, vykázalo nižší nasákavost po 28 i 84 denním ponoření ve vodě. Obdobně plnivo připravené z kůry obsahuje aromatické sloučeniny, které jsou více hydrofobní než polysacharidy obsažené v běli, odpad z papírenské výroby zase obvykle obsahuje anorganické příměsi. Rozměrová stabilita byla ze stejného důvodu u papírenského odpadu nejvyšší, kompozity s plnivem z kůry a odpadu z průmyslové výroby deskových prvků vykázali nižší stabilitu.

U pevnostních charakteristik dosáhla nejvyšších hodnot zkušební tělesa plněná odpadem z výroby deskových prvků a modifikované buničiny pro papírenskou výrobu. Ty se hodnotami přibližovaly zkušebním tělesům plněným dřevní moučkou z běli. Výrazný pokles však zaznamenaly při 40% plnění. Obdobných výsledků bylo dosaženo i u ohybové pevnosti. Rázová houževnost popisující tuhost materiálu byla nejvyšší u zkušebních těles plněných odpadem z papírenské výroby obsahujícím jíl.

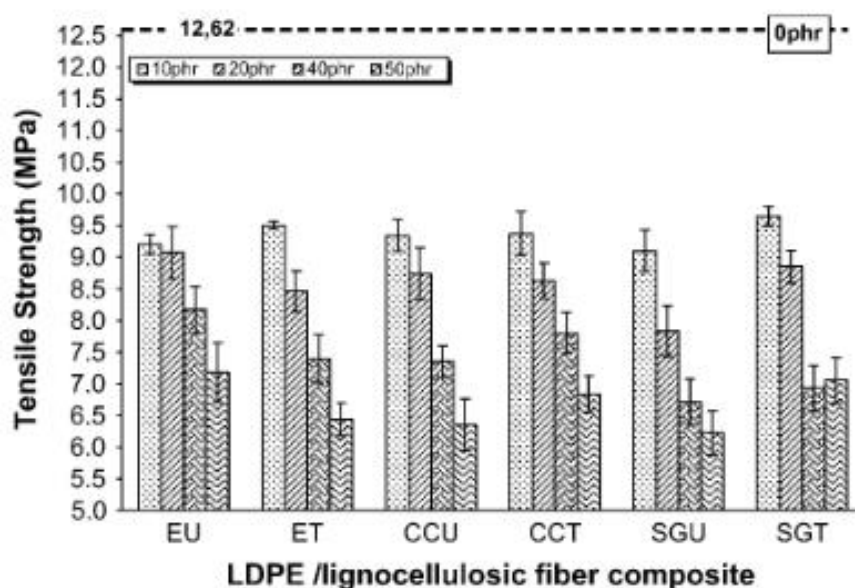
2.2.2 Použití odpadu ze zemědělství

Přírodní vlákna představují materiály s vysokým potenciálem využití při výrobě dřevoplastových kompozitů. V tomto směru lze uplatnit především odpad ze zemědělské výroby disponující širokou nabídkou přírodních vláken. Aktuální studie se zabývaly například výzkumem použití obilné nebo rýžové slámy, zbytků kukuřičných stonků a klasů, rýžových slupek, sójových klasů a dalších. [26], s. 11] Výhodou druhotných plniv ze zemědělského odpadu je jejich vláknový charakter, který obdobně jako dřevní moučka vede ke zvýšení tahových a ohybových charakteristik polymeru.

Využitím odpadu ze zemědělství jako suroviny pro výrobu dřevoplastového kompozitu se zabývaly Wang a kol. [41], s. 133-138]. Jako plnivo byla v tomto případě použita pšeničná sláma rozmělněná na částice o průměrné velikosti 0,2 mm, která byla dávkována do recyklovaného polymeru v objemovém podílu 20 %, přičemž hlavním záměrem studie bylo ověřit vliv přídavku kompatibilizéru a parametry termolisování. Studie ukázala poměrně dobré výsledky hustoty materiálu při zvýšeném přídavku kompatibilizéru a delším časovém úseku lisování.

Georgopoulos a kol. [42], s. 303-312] provedli srovnání vlastností dřevoplastového kompozitu plněného eukalyptovým dřevem, mletými kukuřičnými klasy a odpadního sladového zrna při plnění 10, 20, 40 a 50 % a s různou povrchovou úpravou vláken.

Vyhodnocení tahové pevnosti uvádí následující Graf 26. Jak lze odvodit z uvedených hodnot, vliv typu plniva nebyl významný. Při maximálním plnění dosáhla zkušební tělesa plněná odpadními vlákny obdobných hodnot jako zkušební tělesa plněná dřevní moučkou.

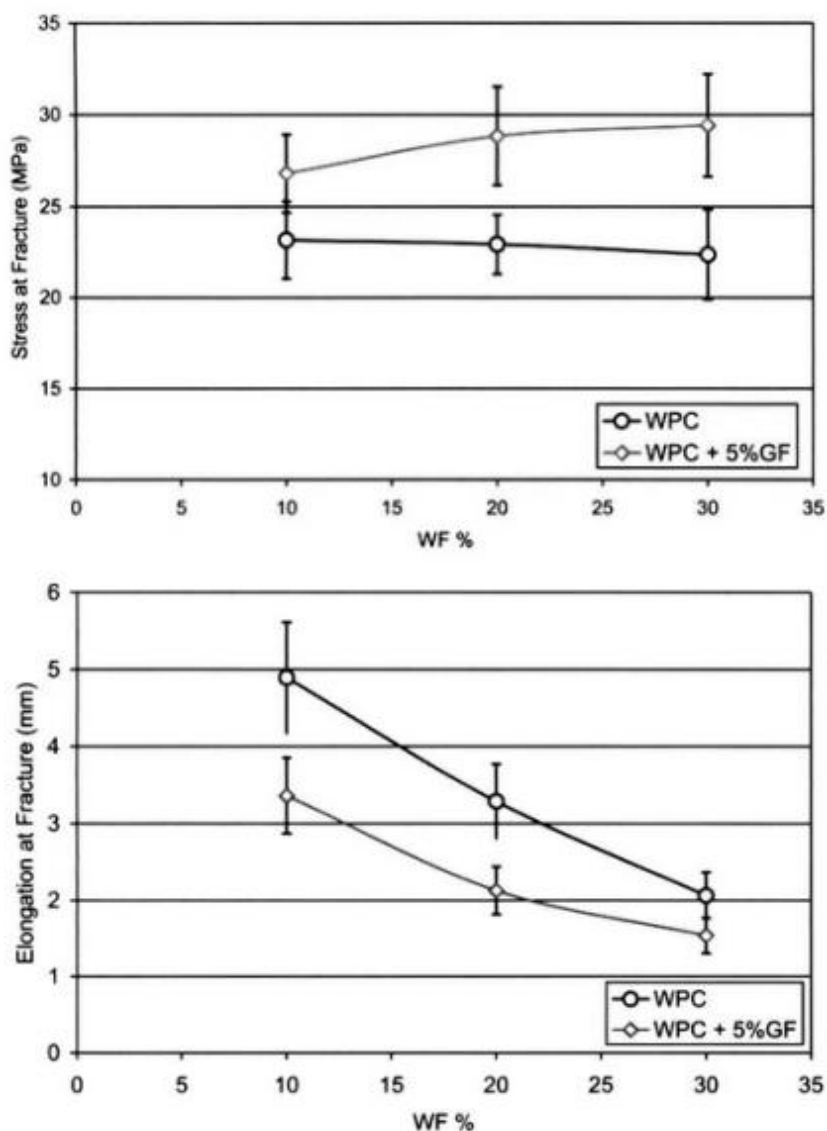


Graf 26 Tahová pevnost zkušebních těles z nízkohustotního polyetylenu plněného z 10, 20, 40 a 50 % eukalyptovým dřevem (EU a ET), odpadem z mletí kukuřičných klasů (CCU a CCT) a odpadem sladového zrna (SGU a SGT) s různou povrchovou úpravou vláken. [42], s. 307]

2.2.3 Použití syntetického nebo anorganického vláknového plniva

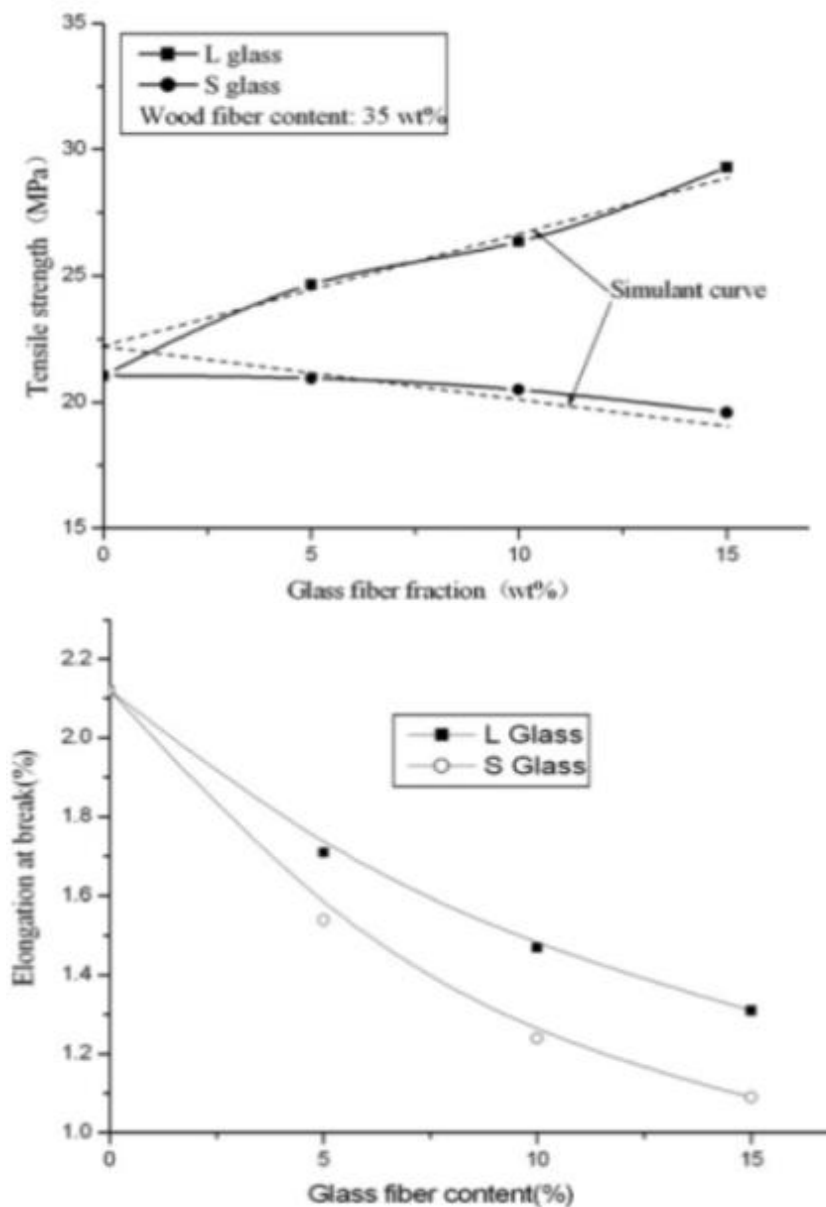
Anorganické a syntetické plnivo s vláknitým charakterem může pocházet buď z primárních, nebo sekundárních zdrojů. Mezi primární zdroje patří především vlákna anorganického původu obecně užívaná v různých průmyslových odvětvích. Jedná se především o vlákna skelná, uhlíková nebo aramidová. Potenciální uplatnění v procesech modifikace plniva dřevoplastového kompozitu mohou však nalézt i odpadní materiály, které se velikostí a indexem zrna přibližují charakteru dřevní moučky.

Nejčastěji se jako vláknová příměs dřevoplastového kompozitu užívají skelná vlákna. Řada studií se zabývala jejich účinkem na konečné vlastnosti materiálu. Rizvi a Semeralul [43], s. 39-42] ověřovali vliv přídavku 5 % skelných vláken do dřevoplastového kompozitu s maticí z vysokohustotního polyetyleny plněného 10, 20 a 30 % dřevní moučky na jeho mechanické vlastnosti. Sledovanou charakteristikou bylo napětí při porušení. Výstupy tahového testování uvádí následující Graf 27. Jak je patrné z uvedených hodnot, 5% příměs skelných vláken zvýšila hodnotu tahové pevnosti a podstatně snížila poměrné prodloužení zkušebních těles modifikovaného dřevoplastového kompozitu při porušení.



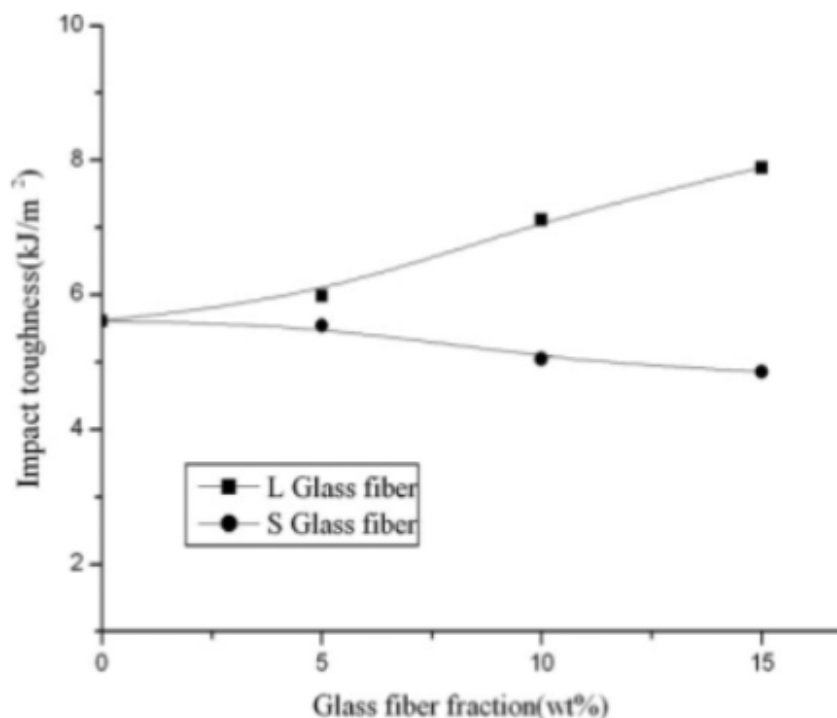
Graf 27 Napětí při porušení (nahore) a poměrné prodloužení (dole) zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s 5% příměsí skelných vláken. [43], s. 41

Cui a Tao [44], s. 1250-1257] provedli studii vlivu přídavku 5, 10 a 15% příměsí skelných vláken do dřevoplastového kompozitu připraveného z recyklovaného vysokohustotního polyetylenu plněného 35 % dřevní moučkou na jeho mechanické vlastnosti. Skelná vlákna byla dávkována ve dvou délkách – 2 mm (S) a 5 mm (L). Vyhodnocení zkoušek tahové pevnosti uvádí následující Graf 28. Jak lze usuzovat z výsledků testování, přídavek vláken o větší délce měl příznivější vliv na mechanické vlastnosti kompozitu, s narůstajícím podílem vzrostla také tahová pevnost při klesajícím poměrném prodloužení. Přídavek vláken s menší délkou vykázal opačný trend tahové pevnosti, protažení dosáhlo srovnatelných hodnot.



Graf 28 Tahová pevnost (nahore) a protažení při porušení (dole) zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s 5, 10 a 15% příměsí skelných vláken o délce S (2 mm) a L (5 mm). [43], s. 1252]

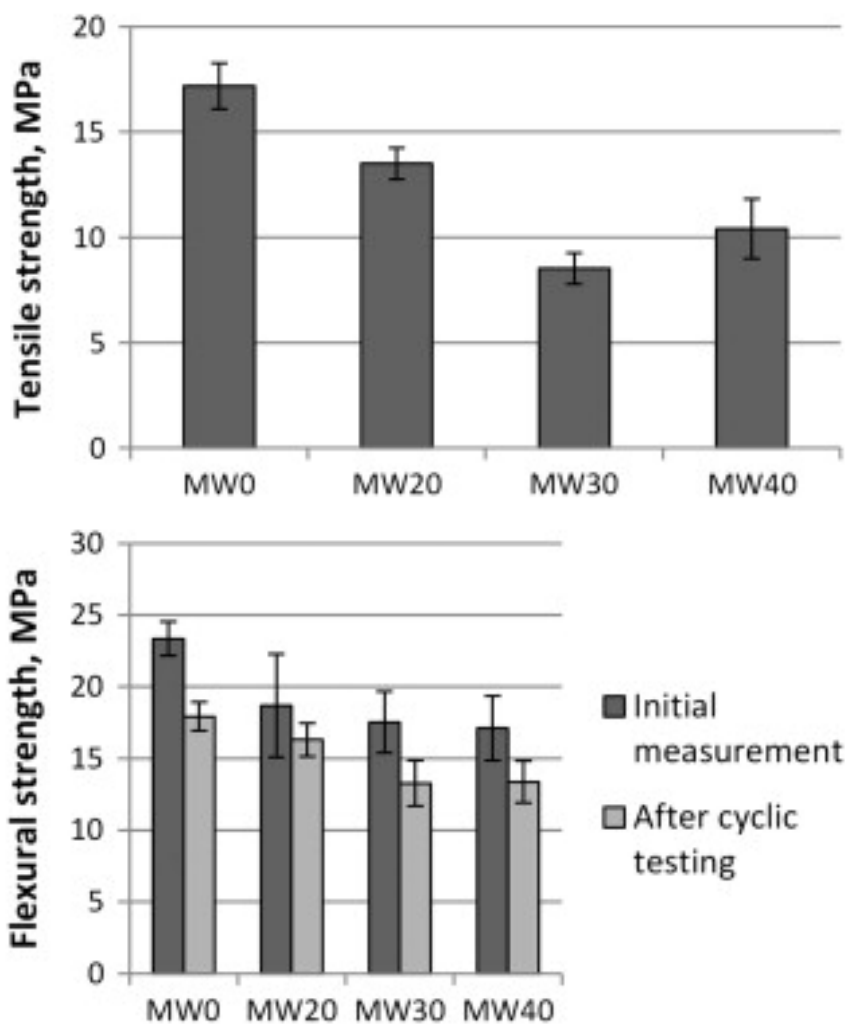
Kromě mechanických charakteristik v tahu byla studie [44], s. 1250-1257] zaměřená také na stanovení rázové houževnatosti kompozitního materiálu. Výstupy zkoušek uvádí následující Graf 29. Trend vlivu přídavku skelných vláken byl obdobný jako u tahové pevnosti, zkušební tělesa s delšími skelnými vlákny byla charakterizována narůstajícími hodnotami při zvyšujícím se přídavku příměsi, naopak u vzorků s kratšími vlákny došlo k postupnému poklesu.



Graf 29 Rázová houževnatost zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s 5, 10 a 15% příměsí skelných vláken o délce S (2 mm) a L (5 mm). [43], s. 1254]

Studium vlivu přídavku skelných vláken na mechanické vlastnosti dřevoplastového kompozitu s polypropylénovou maticí z recyklátu realizovali Al-Maadeed a kol. [45], s. 374-380]. Skelná vlákna v tomto případě nahradila 25 % dřevní hmoty. Výsledný kompozit měl složení 5 % dřevní moučky, 25 % skelných vláken a 70 % recyklovaného polypropylenu s přídavkem kompatibilizéru. Tahová pevnost tato připraveného kompozitu dosáhla 19,5 MPa tedy asi 25 % zvýšení v porovnání s neplněným polypropylenem.

Väntsi a Kärki [46], s. 220-226] realizovali studii zabývající se možností využití minerální vlny získané z odpadu po stavebních a demoličních činnostech. Zkušební tělesa byla připravena z polypropylenové matrice o podílu 30 % plněné z části nebo zcela dřevní moučkou z jehličnatých dřevin a recyklovanou kamennou minerální vlnou. Poměrově byly vzorky složeny z 64% plnění dřevní hmotou (MW0), v poměru 44 / 20% plnění směsí dřevní moučky a odpadní minerální vlny (MW20), a dále v poměru 34 / 30% (MW30) a 24 / 40% (MW40). Surovinové směsi byly vylepšeny aditivy – 3 % kompatibilizéru a 3 % lubrikátu. Zkušební tělesa pro zkoušení vlastností byla vyrobena extruzí a testována s ohledem na vybrané mechanické vlastnosti – tahovou a ohybovou pevnost, a také rázovou houževnatost (Charpy) a tvrdost povrchu (Brinell). Pro stanovení životnosti byla zkušební tělesa podrobena zrychlenému testu stárnutí trvajícím 3 týdny a zahrnujícímu cyklické zatěžování máčením, mrazem a vysušováním. Vyhodnocení pevnostních charakteristik uvádí následující Graf 30.

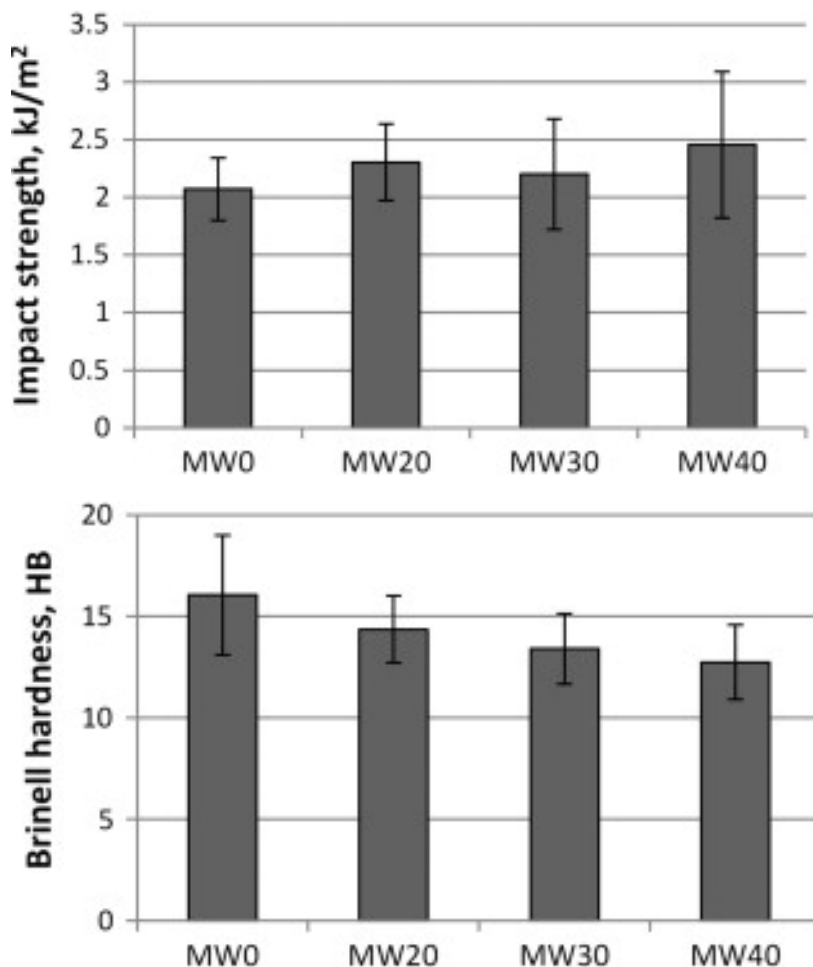


Graf 30 Tahová (nahore) a ohybová (dole) pevnost vzorků připravených z polypropylenové matrice směsného plniva s obsahem dřevní moučky a odpadní minerální vlny v poměrech 64 / 0 (MW0), 44 / 20 (MW20), 34 / 30 (MW30) a 24 / 40 (MW40). Ohybová pevnost byla testována na neporušených (initial measurement) a degradovaných (after cyclic testing) vzorcích. [46], s. 224]

Jak je patrné z uvedených grafů, anorganické plnivo negativně ovlivňuje pevnostní charakteristiky modifikovaného dřevoplastového kompozitu, což je připisováno špatné orientaci vláken odpadního plniva (některá vlákna nebyla orientována ve směru extruze) a nedostatečné adhezi. U vzorků se směsným plnivem obsahujícím 30 % odpadní minerální vlny došlo k výraznému výkyvu hodnot, což je pravděpodobně způsobeno právě špatnou orientací vláken. U vzorků testovaných na ohybovou pevnost došlo k obdobnému poklesu, který se zřejmě projevil po vystavení nepříznivému prostředí.

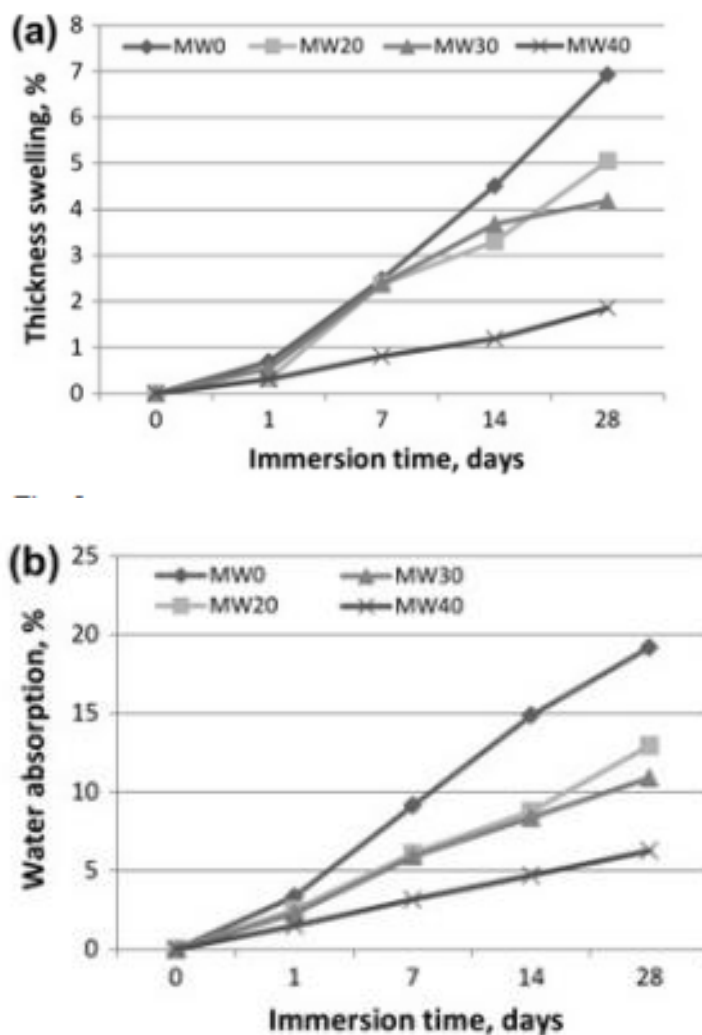
Kromě pevnostních charakteristik byla hodnocena také rázová houževnatost a povrchová tvrdost kompozitních zkušebních těles. Rázová houževnatost dosáhla se zvyšujícím se podílem odpadní minerální vlny mírného nárůstu, mírný výkyv v hodnotách byl rovněž zaznamenán u vzorků s 30% podílem. Tvrdost povrchu navzdory předpokladu vykazala

postupný lineární pokles. Příčinou je pravděpodobně rovněž nevhodná orientace vláken anorganického plniva. Výstupy těchto zkoušek uvádí následující Graf 31.



Graf 31 Rázová houževnatost (nahore) a tvrdost dle Brinella (dole) vzorků připravených z polypropylenové matrice směsného plniva s obsahem dřevní moučky a odpadní minerální vlny v poměrech 64 / 0 (MW0), 44 / 20 (MW20), 34 / 30 (MW30) a 24 / 40 (MW40). Ohybová pevnost byla testována na neporušených a degradovaných vzorcích. [46], s. 225]

Vliv na fyzikální vlastnosti ilustruje následující Graf 32. Pro stanovení nasákavosti a bobtnání byly vzorky ponořeny 28 dnů do vody pokojové teploty, jak je zřejmé z výsledků, hydrofobní anorganické plnivo má pozitivní vliv na chování kompozitu ve vlhkém prostředí.



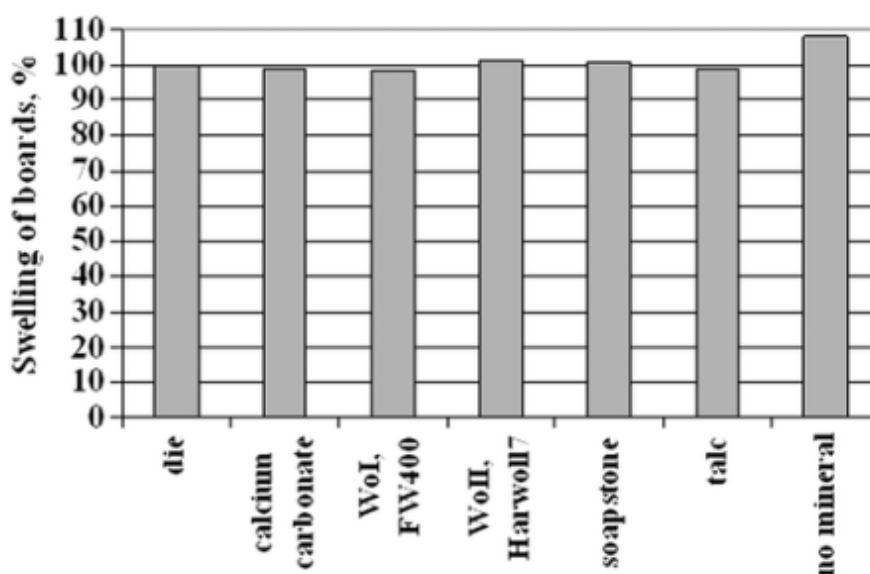
Graf 32 Bobtnání (a) nahoře) nasákavost (b) dole) vzorků připravených z polypropylenové matrice směsného plniva s obsahem dřevní moučky a odpadní minerální vlny v poměrech 64 / 0 (MW0), 44 / 20 (MW20), 34 / 30 (MW30) a 24 / 40 (MW40). Ohybová pevnost byla testována na neporušených a degradovaných vzorcích. [46], s. 225]

2.2.4 Použití částicového anorganického plniva

Anorganická částicová plniva pro modifikaci dřevoplastového kompozitu mají obvykle minerální charakter. Jedná se o filery ve frakcích mikro nebo nanočástic. Sférická tělesa nebo tělesa tvarově odpovídající sférickému charakteru představují příměsi dřevoplastového kompozitu se specifickými vlastnostmi a impaktem, který souvisí nejen s jejich tvarem, ale také s jejich fyzikálními, fyzikálně mechanickými a chemickými charakteristikami. Mikročásticové plnivo obvykle nahrazuje část dřevní moučky, nanočásticové plnivo bývá náhradou části matrice, jejíž vlastnosti jsou primárně vylepšeny. V případě nanočásticového plniva je kompozit označován jako hybridní a podíl bývá mnohem nižší než při standardní náhradě plniva mikročásticemi.

Huuhilo a kol. [47], s. 34-40] provedli soubornou studii vlivu přídavku minerálních částic jako příměsí plniva dřevoplastového kompozitu. Příměsí tvořil uhličitan vápenatý, dva typy wollastonitu, mastek a talek. Jelikož některé příměsí působí jako lubrikanty (např. talek), je možné jejich přídavkem snížit obsah aditiv syntetického původu (boritan zinečnatý). Zkušební tělesa byla vyrobena z polypropylenové matrice v podílu 30 %, dřevní moučka v podílu 44 % a anorganického plniva v podílu 20 %. Jako aditivum byl použit maleinandhydridový kompatibilizér v podílu 3 % a lubrikant rovněž v podílu 3 %. Referenční vzorky obsahovaly 75 % dřevní moučky, 22 % polypropylenu a 3 % kompatibilizéru.

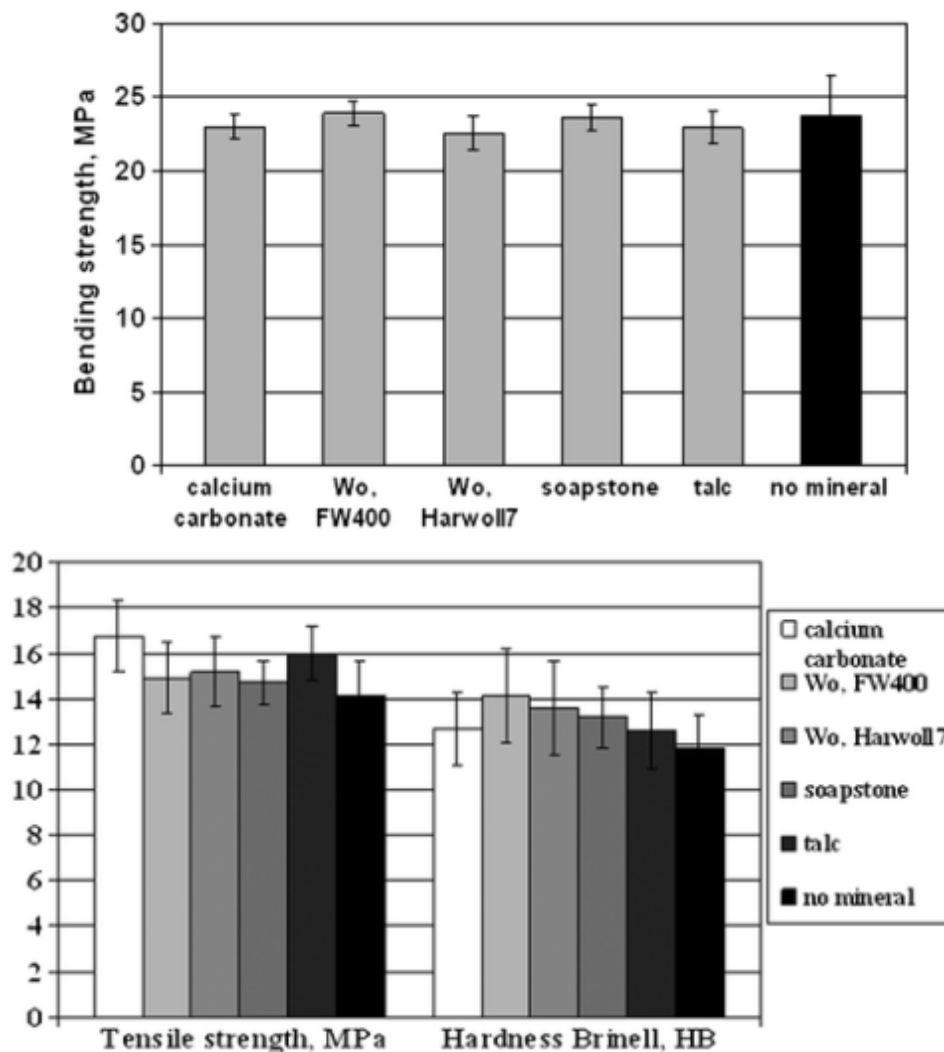
Zkoušení extrudovaných zkušebních těles se zaměřovalo na posouzení fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností v postprodukčním stavu a po vystavení nepříznivým podmínkám zahrnujícím cyklické zatěžování ponořením do vody, mrazem a vysušováním po dobu 28 dnů. Následující Graf 33 uvádí vyhodnocení rozměrové stability vzorků po odformování. Jak lze usuzovat na základě srovnání s rozměry formy, na rozdíl od vzorků obsahujících pouze dřevní moučku, u něhož došlo k nárůstu rozměrů téměř o 10 %, vzorky s příměsí částicového plniva vykázaly pouze minimální odchylky od původních rozměrů formy.



Graf 33 Rozměrová stabilita připravených z polypropylenové matrice směsného plniva s obsahem dřevní moučky a různých typů minerálního částicového plniva v poměru 30 / 44 / 20 %: [47], s. 38]
 Die = velikost formy, calcium carbonate = uhličitan vápenatý, wo (I a II) = wollastonit, soapstone = mastek, talc = talek, no mineral = kompozit ve složení 22% polypropylen / 75 % dřevní moučka.

Zkoušení mechanických vlastností bylo zaměřeno na stanovení tahové a ohybové pevnosti, a následně povrchové tvrdosti dle Brinella. Výstupy provedených zkoušek uvádí následující Graf 34. Jak lze usuzovat z provedených zkoušek, přídavek minerálního

částicového plniva zvyšuje tahovou pevnost dřevoplastového kompozitu (nejvyšších hodnot dosáhly vzorky s příměsí uhličitanu vápenatého a talku) a také tvrdost povrchových vrstev (nejvyšších hodnot dosáhly vzorky s příměsí wollastonitu a mastku). Pevnost v ohybu zkušebních těles byla srovnatelná s pevností kompozitu bez příměsí částicového plniva.



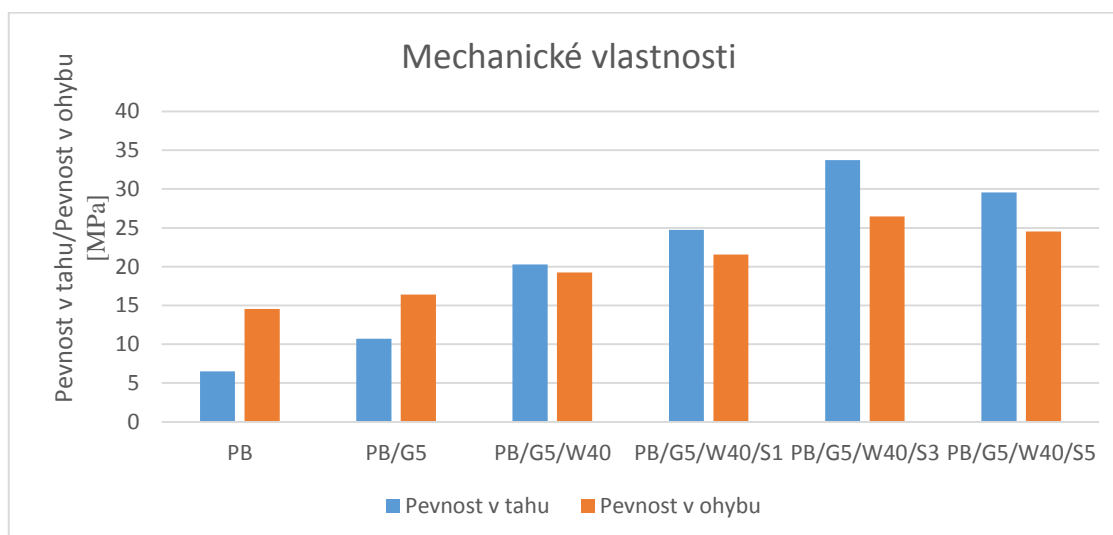
Graf 34 Ohybová pevnost (nahore) a tvrdost dle Brinella (dole) vzorků připravených z polypropylenové matrice a směsného plniva s obsahem dřevní moučky a různých typů minerálního částicového plniva v poměru 30 / 44 / 20 %: [47], s. 38]

Calcium carbonate = uhličitan vápenatý, wo (I a II) = wollastonit, soapstone = mastek, talc = talek, no mineral= kompozit ve složení 22% polypropylen / 75 % dřevní moučka.

Některé současné studie ukazují, že příměsí anorganického (minerálního) plniva je dosaženo pozitivního vlivu zejména na kompaktnost struktury materiálu a související vlastnosti, jako jsou navlhavost nebo pevnost. Nejčastěji se užívá příměsí talku, slídy nebo kaolinu [48], s. 1491-1497; [49], s. 20-28]. Další studie doplňují tento seznam o uhličitan vápenatý, křemen nebo wollastonit [50], s. 2087-2094]., případně o prefabrikáty nebo speciálně připravená plniva, jako jsou mikročástice uhlíku nebo skelná vlákna a jílové

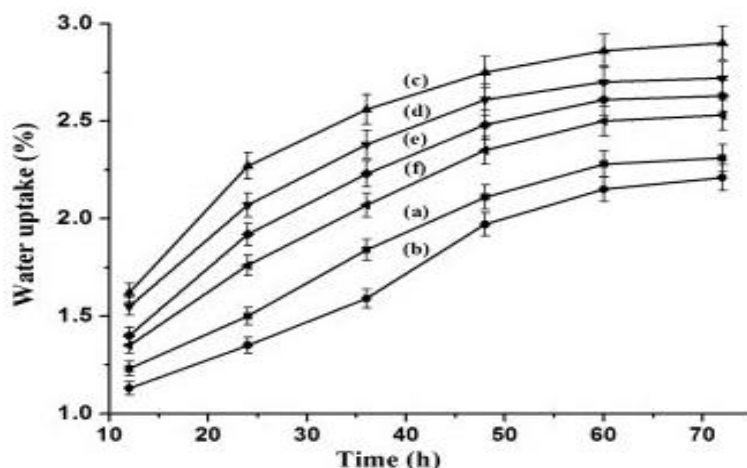
nanočástice [51], s. 73-79]. Přídavkem anorganického plniva dochází u WPC nejčastěji k ovlivnění mechanických vlastností. Charakter minerálních plniv zprostředkuje materiálu lepší chování při zatížení tlakem a zlepšuje také další mechanické vlastnosti, odolnost proti vyšším teplotám, rozměrovou stabilitu, nízkou hořlavost a dobré elektrické vlastnosti, díky kterým mohou konkurovat strojírenským termoplastům [50], s. 2087-2094].

Speciální užití jako příměs dřevoplastového kompozitu pak mají nanočástice. Deka a Taji [52], s. 1516-1523] realizovali studii vlivu příměsi nanočásticové siliky na fyzikální a mechanické vlastnosti dřevoplastového kompozitu. Matrici tvořila směs vysokoustotního a nízkoustotního polyethylenu, polypropylenu a polyvinylchloridu plněná ze 40 % dřevní moučkou a příměsí 1, 3 a 5 % nanosiliky. Vyhodnocení mechanických vlastností uvádí následující Graf 35. Jak je patrné z naměřených hodnot, příměs nanosiliky se jako optimální pro zlepšení mechanických vlastností ukázala v množství 3 %.



Graf 35 Mechanické charakteristiky vzorků připravených ze směsné matrice s obsahem 40 % dřevní moučky a příměsí nanosiliky 1, 3 a 5 %, upraveno dle [52], s. 1521]

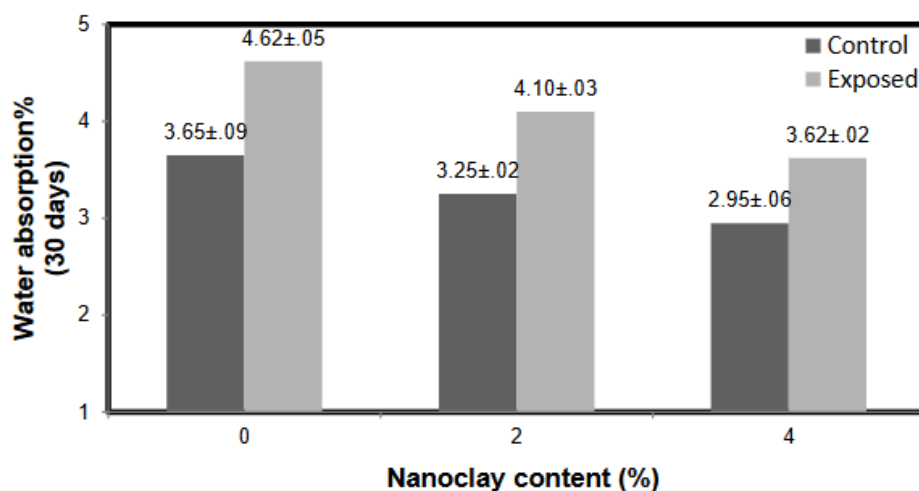
Kromě vlivu na mechanické vlastnosti daná studie [52], s. 1516-1523] hodnotila také nasákavost zkušebních těles, a to po ponoření do destilované vody o teplotě 30°C po 12, 24, 36, 48, 60 a 72 hodin. Výstupy zkoušení nasákavosti uvádí následující Graf 36. Průběh křivek nasákavosti v závislosti na době ponoření je u všech vzorků podobný, nejvyšší nasákavosti dosáhly vzorky kompozitu s 40% plněním bez příměsí nanosiliky, nejnižších pak vzorky neplněné polymerní směsi. Vyhodnocení nasákavosti prokázalo pozitivní vliv příměsí na tuto charakteristiku, nejnižších hodnot mezi kompozity s modifikovaným plnivem dosáhly vzorky obsahující 5% příměs.



Graf 36 Nasákavost vzorků připravených ze směsné matrice s obsahem 40 % dřevní moučky a příměsí nanosiliky 1, 3 a 5 % v závislosti na době ponoření: [52], s. 1522]

(a) PB; (b) PB/G5; (c) PB/G5/W40; (d) PB/G5/W40/S1; (e) PB/G5/W40/S5; (f) PB/G5/W40/S3.

Studii vlivu příměsí nanojílu na fyzikální vlastnosti dřevoplastového kompozitu realizovali Eshraghi a kol. [53], s. 201-210]. Zkušební těles byla připravená z matrice z vysokohustotního polyetyleny s podílem 52 %, jehož část byla nahrazena 2 a 4% příměsí nanojílu, plněné dřevní moučkou v 40% podílu. Směs byla vylepšena 3 % kompatibilizéru. Vyhodnocení nasákavosti bylo provedeno po expozici zrychlenému stárnutí v ozařovací komoře s xenonovou lampou. Stárnutí trvalo 2000 hodin při 120 minutových cyklech (102 minut osvětlení, 18 minut skrápění). Vyhodnocení nasákavosti (30 dní ponoření do destilované vody při pokojové teplotě) uvádí následující Graf 37. Testování prokázalo významný vliv příměsí na nasákavost zkušebních, a to jak v postprodukčním stavu, tak po expozici nepříznivým podmínkám. Tuto skutečnost lze přisuzovat kompaktnějšímu charakteru matrice.



Graf 37 Nasákavost před a po expozici zrychlenému stárnutí vzorků připravených z matrice z vysokohustotního polyetyleny s obsahem 40 % dřevní moučky a příměsí nanojílu 0, 2 a 4 % [53], s. 201-210]

2.2.5 Modifikace plniva – shrnutí

Modifikaci plniva dřevoplastového kompozitu druhotnými surovinami lze s ohledem na charakter použitelných materiálů provést dvěma způsoby, a to jako modifikaci vláknovou nebo částicovou výztuží. Pro modifikaci vláknovým plnivem se kromě běžných syntetických vláken nabízí řada druhotných surovin, které jsou primárně odpadem ze zpracování přírodních materiálů. Hlavní část použitelných surovin v této oblasti tvoří odpad z dřevozpracujícího průmyslu, kterým je směsná dřevní moučka často obsahující kromě běle a jádra také kůru.

Vedle odpadu z dřevozpracujícího průmyslu se jako vhodný ukázal také odpad z papírenství a přidružené výroby stavebních prvků na bázi dřeva, jako jsou OSB desky nebo LVL. U těchto surovin se však vždy musí počítat s rezidui nečistot. Použitelný odpad z papírenské výroby může přispět ke zlepšení některých sekundárních vlastností dřevoplastového kompozitu, jelikož často obsahuje anorganické materiály sloužící k dosažení požadované jakosti produktu. U přidružené výroby stavebních prvků může být plnivo znečištěno zbytky termosetů sloužících ke spojování dřevní hmoty.

Zvláštní oblast druhotných surovin pro modifikaci plniva dřevoplastového kompozitu tvoří odpad ze zemědělské výroby. Do této kategorie se řadí zpracovaná sláma, slupky, klasy apod. Výhodou odpadu rostlinné výroby je jeho přírodní vláknový charakter, který v kompozitu působí obdobně jako dřevní vlákna. Vzhledem k pevnostním charakteristikám, jež jsou u těchto vláken obvykle nižší, než jakých dosahuje dřevní moučka, je však nutné přizpůsobit surovinové složení předpokládané aplikaci, případně provést úpravu povrchu vláken vedoucí ke zvýšení jejich pevnosti.

Kromě organických surovin lze plnivo dřevoplastového kompozitu modifikovat také anorganickými příměsemi. Vlákenné příměsi v této oblasti obvykle nezahrnují zpracovaný odpadní materiál. Ten lze využít pouze zřídka a může jej tvořit například odpadní skelná nebo kamenná vata, jejich nevýhodou je však všesměrná orientace vláken, která snižuje efekt vyztužení. Pro modifikaci plniva se spíše využívají syntetická vlákna, zpravidla se pracuje s vlákny skelnými, která se do kompozitu dávkuje ve formě směsného plniva, tedy jako částečná náhrada dřevní moučky. Jejich příměsí je dosaženo výrazné zlepšení chování materiálu pod tahovým a ohybovým zatížením.

Samostatnou kategorií příměsí pak tvoří částicová plniva. Záměr přidavku částicových plniv se obvykle orientuje na zlepšení sekundárních vlastností kompozitu, jako je tvrdost povrchu nebo rázová houževnatost. Integrace částicového plniva do struktury kompozitu se liší v závislosti na horní mezi velikosti částic. Je-li kompozit vylepšován příměsí v řádu

mikročásteč, její podíl se pohybuje v desítkách procent a v procesu zpracování se před homogenizací mísí s plnivem, jehož část nahrazuje. V případě, že je anorganické plnivo přidáváno ve frakci řádu nanočástic, před zpracováním surovinové směsi je homogenizováno s matricí a tvoří její filer. Hlavním cílem přidavku částicového plniva je dosažení kompaktnější struktury kompozitu, která by se měla promítnout do jeho citlivosti k působení nepříznivých faktorů a implicitně do jeho životnosti.

II. Experimentální část

1 Cíl práce

Stávající dřevoplastové kompozity představují materiál s vysokým potenciálem pro užití ve stavebním průmyslu. Předkládaná disertační práce se zabývá výzkumem vlastností dřevoplastového kompozitu, které jsou modifikovány druhotnými surovinami běžně užívanými ve stavební výrobě. Praktická část je rozdělena do dvou směrů výzkumu, jejichž obsah se orientoval separátně na modifikaci **matrice** recyklovaným polymerem a modifikaci **plniva** druhotnou surovinou částicového charakteru.

Cílem provedeného výzkumu bylo komplexně zhodnotit vliv modifikace plniva a modifikace matrice vhodnou druhotnou surovinou na konečné fyzikální, mechanické a vzhledové vlastnosti dřevoplastového kompozitu. S ohledem na potenciální využití modifikovaného WPC ve stavebnictví byly vyvíjené směsi posuzovány také z hlediska degradace v nepříznivých exteriérových podmínkách. Práce byla rozdělena do čtyř etap, které sledovaly tyto dílčí cíle:

1. Etapa výzkumu provedeného v disertační práci se zaměřovala na **přípravu výzkumného záměru**. V rámci této etapy byla provedena rešerše dostupných surovin pro oba typy modifikace dřevoplastového kompozitu, odvozeno složení receptur jednotlivých sérií zkušebních těles a stanovena procesní metodika výrobních a zkušebních postupů. V této etapě bylo provedeno posouzení vhodné metodologie stanovení jednotlivých charakteristik s ohledem na primární aplikaci materiálu.
2. Etapa disertační práce se zaměřovala na stanovení vybraných vlastností dřevoplastového kompozitu **modifikovaného podílem polymerního recyklátu v matrici**. V rámci této etapy byla vyrobena a odzkoušena zkušební tělesa s variabilním podílem regranulátu v matrici. Tato etapa byla rozdělena na tři dílčí chronologicky navazující podetapy zahrnující zkoušení vlastností zkušebních těles v postprodukční fázi a po expozici 2 typům zrychleného stárnutí. To se zaměřovalo na stanovení základních fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností připravených kompozitů a na posouzení jejich chemické a morfologické struktury nedestruktivními metodami. Druhá a třetí podetapa zahrnovala provedení zrychleného testu stárnutí vystavením dvěma cyklickým zkouškám – expozici UV záření v ozařovací komoře a cyklickému zatěžování vlhkostí, mrazu a vysoušení, na něž

následně navazovalo opětovné stanovení sledovaných veličin pro posouzení vlivu degradačních faktorů na vlastnosti materiálu.

3. V této etapě byla obdobným postupem jako ve druhé etapě provedena evaluace vlivu **modifikace plniva variabilním podílem příměsi druhotné částicové suroviny** na fyzikální, fyzikálně mechanické a vzhledové vlastnosti dřevoplastového kompozitu. Etapa byla rovněž rozdělena do tří podetap.
4. Závěrečná etapa výzkumu realizovaného v rámci disertační práce byla zaměřená na **vyhodnocení provedeného laboratorního testování** a posouzení vhodnosti vybraných způsobů modifikace dřevoplastového kompozitu na jeho uplatnění ve stavebních aplikacích.

2 Metodika prováděných zkoušek

Zkoušení kompozitního materiálu bylo realizováno v návaznosti na standardizované metodiky dané přijatými normami. Metodické postupy zahrnovaly tři specifické okruhy zkoušek. Jednalo se o zkušební postupy pro stanovení fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností, zkušební postupy pro stanovení chemické struktury a morfologie kompozitu a zkušební postupy pro realizaci testů zrychleného stárnutí.

Zkušební postupy zaměřené na stanovení klíčových fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností zahrnovaly následující zkoušky:

- Stanovení nasákavosti zkušebních těles,
- Stanovení tahové pevnosti,
- Stanovení poměrného prodloužení v tahu,
- Stanovení modulu pružnosti v tahu,
- Stanovení ohybové pevnosti.

Zkušební postupy, jimiž byly posuzovány chemická struktura a morfologie kompozitního materiálu zahrnovaly následující techniky:

- Infračervená absorpční spektroskopie,
- Elektronová mikroskopická analýza.

Zkušební postupy pro realizaci testů zrychleného stárnutí byly následující:

- Cyklické zatěžování vlhkostí, mrazem a vysoušením,
- UV ozařování.

Podrobná metodologie jednotlivých zkušebních postupů je uvedena v následujících podkapitolách.

2.1 Zkušební postupy pro fyzikální a fyzikálně mechanické vlastnosti

Fyzikální a fyzikálně mechanické vlastnosti připravených zkušebních těles byly stanoveny dle postupů uvedených v příslušných normách. Podmínky zkoušek a způsob vyhodnocení jsou uvedeny níže.

2.1.1 Stanovení nasákavosti zkušebních těles

Stanovení nasákavosti zkušebních těles bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 62:2008 – Plasty: Stanovení nasákavosti. Zkouška probíhá ponořením zkušebních těles do destilované vody o stálé laboratorní teplotě $23\pm 1^\circ\text{C}$. Před vlastním ponořením musí být vzorky vysušeny při teplotě $(50\pm 2)^\circ\text{C}$ nejméně 24 hodin. Doba imerze je vždy násobkem 1 dne (24 hod).

Při provádění zkoušky byla zkušební těles ponořena v kontejneru v destilované vodě dané teploty po dobu 28 dnů, přičemž odečet hodnot nasákavosti byl proveden po 2, 4, 8, 14 a 28 dnech. Stanovení nasákavosti c bylo poté provedeno dle vzorce:

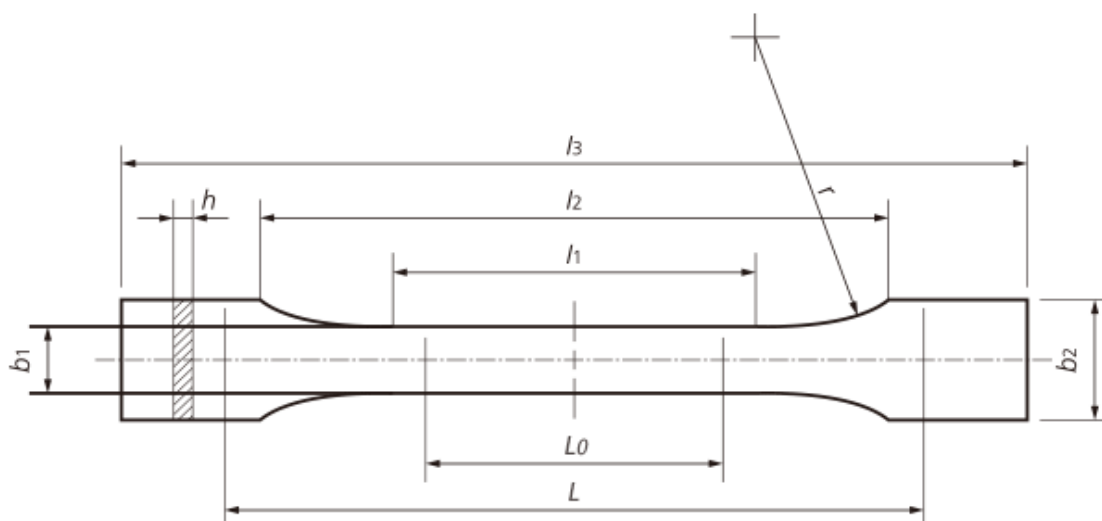
$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \% \quad (1)$$

přičemž m_1 je hmotnost vzorku v mg po vysušení před vložením do vodní lázně,

m_2 je hmotnost vzorku v mg po vyjmutí z vodní lázně.

2.1.2 Stanovení tahové pevnosti

Stanovení tahové pevnosti bylo provedeno dle normy ČSN EN ISO 527 – Plasty: Stanovení tahových vlastností. V návaznosti na charakter materiálu byly veškeré zkoušky provedeny na zkušebních tělesech typu 1B, jejich tvarové a rozměrové provedení uvádí následující Obrázek 11.



Parametr	Testovací těleso 1B [mm]
Celková délka (l_3)	150
Délka zúžené rovnoběžné části (l_1)	60
Počáteční měřená délka (L_0)	50
Šířka zúžené rovnoběžné části (b_1)	10
Tloušťka (h)	4
Šířka konců (b_2)	20
Počáteční vzdálenost čelistí (L)	115

Obrázek 11 Zkušební těleso 1B dle ČSN EN ISO 527.

Zkouška tahové pevnosti byla provedena na zkušebním zařízení Testometric M350-20CT s externím tenzometrem (Obrázek 12) umožňujícím přímý odečet maximální hodnoty tahového napětí a deformace. Před vlastní zkouškou bylo vždy nutné změřit rozměry zatěžované plochy v zúžené (pracovní) části zkušebního tělesa.



Obrázek 12 Testovací zařízení Testometric M350-20CT s externím tenzometrem.

Zkušební těleso je při zkoušce centricky upevněno v čelistech zkušebního zařízení umístěných na jednom stabilním a jednom pohyblivém příčnicku. Před zahájením zatěžování se pracovní část zkušebního tělesa osadí externím tenzometrem v základní poloze. Zatěžování pak probíhá plynulým pohybem příčnicku svisle nahoru rychlostí 1 mm/min. Zkouška byla vždy prováděna v deformačním režimu. Stanovení tahové pevnosti bylo vypočteno dle následujícího vztahu:

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

příčemž σ je hodnota příslušného napětí v megapascálech (MPa),

F je hodnota příslušné naměřené síly v newtonech (N),

A je počáteční průřez zkušebního tělesa v pracovní části v milimetrech (mm).

2.1.3 Stanovení poměrného prodloužení

Poměrné prodloužení (protažení) bylo stanoveno dle postupu uvedeného v normě ČSN EN ISO 527 – Plasty: Stanovení tahových vlastností pomocí extenzometru. Počáteční délka mezi roztečemi extenzometru byla 10 mm. Vyhodnocení poměrného prodloužení bylo provedeno dle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \quad (3)$$

příčemž ε je hodnota příslušného poměrného prodloužení (-),

L_0 je počáteční měřená délka zkušebního tělesa (10 mm),

ΔL_0 je zvětšení počáteční změřené délky zkušebního tělesa (mm).

2.1.4 Stanovení modulu pružnosti v tahu

Modul pružnosti v tahu byl stanoven současně s tahovou pevností a poměrným prodloužením dle stejné normy ČSN EN ISO 527 – Plasty: Stanovení tahových vlastností pomocí externího tenzometru. Hodnoty pro stanovení modulu pružnosti jsou odečítány při hodnotě poměrného prodloužení 0,05 a 0,25 % počáteční hodnoty (10 mm). Hodnota modulu pružnosti v tahu se pak stanoví dle vztahu:

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} [MPa] \quad (4)$$

přičemž E_t je modul pružnosti v tahu (MPa),

σ_1 je napětí (MPa) naměřené při hodnotě poměrného prodloužení $\varepsilon_1 = 0,0005$ (0,05 %),

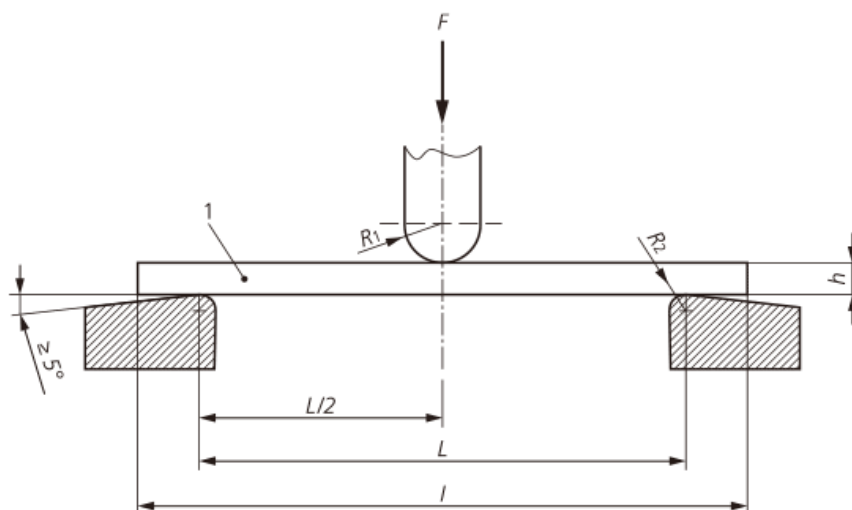
σ_2 je napětí (MPa) naměřené při hodnotě poměrného prodloužení $\varepsilon_2 = 0,0025$ (0,25 %).

2.1.5 Stanovení ohybové pevnosti

Pevnost v ohybu byla hodnocena na stejných zkušebních tělesech jako pevnost v tahu. Postup byl proveden dle normy ČSN EN ISO 178 Plasty – Stanovení ohybových vlastností. Zkoušení bylo realizováno na testovacím zařízení Testometric M350-20CT (Obrázek 13). Schéma zatěžování je uvedeno na následujícím obrázku (Obrázek 14). Před vlastním zatěžováním bylo vždy nutné stanovit tloušťku a šířku (zatěžovanou plochu) zkoušeného vzorku v pracovní části.



Obrázek 13 Zatěžování ohybem na testovacím zařízení Testometric M350-20CT.



Parametr	Doporučená délka vzorku
Délka vzorku (l)	80 mm
Šířka vzorku (b)	10 mm
Tloušťka vzorku (h)	4 mm
Poloměr zatěžovacího trnu (R_1)	5 mm
Poloměr podpor (R_2)	5 mm
Vzdálenost podpor (L)	16h (64 mm)

Obrázek 14 Schéma zatěžování ohybem dle ČSN EN ISO 178.

Pro provedení zkoušky se zkušební těleso umístí kolmo na podpory a na rovinu zatěžovacího trnu osazeného na pohyblivém příčnicku zařízení Testometric M350-20CT. Zkouška probíhá v deformačním režimu posunem pohyblivého příčnicku svisle dolů rychlostí 1 mm/min až do porušení zkušebního tělesa. Stanovení pevnosti v ohybu bylo realizováno dle vztahu:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \text{ [MPa]} \quad (5)$$

příčemž σ_f je příslušné napětí v ohybu (MPa),

F je maximální dosažená síla (N),

L je rozpětí podpor (dle průměrné tloušťky vzorku 64 mm),

b je šířka zkušebního (mm),

h je tloušťka zkušebního tělesa.

2.2 Zkušební postupy pro stanovení chemické struktury a morfologie

Chemická struktura a morfologie byly hodnoceny prostřednictvím nedestruktivních metod. Jejich postupy jsou uvedeny v textu níže.

2.2.1 Infračervená absorpční spektroskopie

Studium chemické struktury připravených kompozitů bylo provedeno Infračervenou absorpční spektroskopií na spektroskopu PerkinElmer® Frontier IR Single-Range. Vzhledem charakteru vzorků byla zvolena technika ATR (Attenuated total reflectance – zeslabené totální reflektance). Tato technika spočívá ve snímání svazku infračerveného záření odraženého od povrchových vrstev analyzovaného materiálu. Svazek záření, který je emitován zdrojem při této technice prochází speciálním (diamantovým) krystalem, který jej láme tak, že je možné stejnou cestou snímat i absorpční spektrum materiálu. Proces snímání uvádí následující Obrázek 15.



Obrázek 15 Infračervený absorpční spektroskop.

Při měření spektra zkoušeného vzorku dochází k interakci záření infračerveného spektra (tzn. ve vlnových délkách střední oblasti 5 – 30 μm odpovídající vlnočtu přibližně 4000 – 400 cm^{-1}). Při shodě vlnové délky s délkou chemické vazby v molekule reaguje tato vibrací (valenční nebo deformační), která spotřebuje (absorbuje) energii záření na dané vlnové délce. Tento jev se projeví úbytkem intenzity odraženého spektra. Podle polohy spektrálního pásu charakterizujícího tento úbytek na ose celého infračerveného spektra je možné stanovit, o jakou chemickou vazbu se jedná.

Výstupem měření je tzv. spektrogram, tedy záznam intenzity odraženého spektra tvořící souvislou křivku v daném rozmezí vlnočtu. Polymerní látky obvykle reagují valenčními vibracemi v oblasti 4000 – 1500 cm^{-1} , která je označována jako oblast skupinových vibrací polymerů. Deformační vibrace se zpravidla vyskytují v tzv. oblasti otisku palce (1500 – 400 cm^{-1}). Příklad spektrogramu je uveden na následujícím Spektrogram 4.



Spektrogram 4 Příklad infračerveného absorpčního spektrogramu označující oblast skupinových vibrací polymerů a oblast otisku palce.

2.2.2 Elektronová mikroskopická analýza

Snímkování povrchu a lomových ploch zkušebních těles bylo provedeno na elektronovém rastrovacím mikroskopu TESCAN MIRA3 XMU na zlomech kompozitních vzorků. Před každým měřením bylo nutné kvůli zajištění vodivosti vzorky pozlatit. Vzorky jsou následně umístěny do měřicí komory, před vlastním měřením je v komoře vytvořeno vakuum. Proud elektronů je emitován Schottkyho autoemisní katodou.

2.3 Zkušební postupy pro testy zrychleného stárnutí a požární odolnosti

Testování zrychleného stárnutí bylo realizováno dvěma postupy. První z nich se zaměřoval na působení vlhkosti a namáhání vzorků bobtnáním a vysycháním při různých teplotách. Druhý spočíval ve vystavení zkušebních těles UV záření v ozařovací komoře. Zkoušení požární odolnosti bylo provedeno v laboratořích Stavební fakulty VŠB-TUO.

2.3.1 Cyklické zatěžování vlhkostí, mrazem a vysoušením

Cyklické zatěžování nepříznivými podmínkami bylo provedeno postupem předepsaným předběžnou normou ČSN P CEN/TS 15534 – Kompozity plast-dřevo (WPC), který se zakládá na cyklické změně environmentálních podmínek (vlhkost, mráz, zvýšená teplota). Cyklické stárnutí bylo realizováno dle normy ČSN EN ISO 321 (jak vyžaduje předběžná norma), jeden cyklus se skládal ze čtyř různých typů expozice (viz Tabulka 2). Vzorky byly vystaveny 3 a 9 degračním cyklům.

Tabulka 2 Podmínky cyklického zrychleného testu stárnutí dle ČSN EN ISO 321.

Typ prostředí	Podmínky
Vlhkost	Ponoření do vodní lázně (pH = 7 ± 1; 20 ± 1 °C) na 70 ± 1 h
Mráz	Vysušení, umístění do mrazicí jednotky (-12 °C to -25°C) na 24 ± 1 h
Zvýšená teplota	Ihned po vyjmutí z mrazicí jednotky umístění do sušárny (70 ± 2°C) na 70 ± 1 h
Chlazení	Laboratorní podmínky (20 ± 5 °C) na 4 ± 0.5 h

2.3.2 UV ozařování

Zrychlené stárnutí bylo realizováno působením UV záření v komoře Solarbox 1500 od výrobce Erichsen GmbH (Obrázek 16) při stupni ozáření 10 (odpovídá $800 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) 1000 hodin. Komora byla osazena xenonovou lampou. Cyklické zatěžování nepříznivými podmínkami bylo provedeno dle postupů uvedených v normě ČSN EN ISO 4892-2 Plasty – Metody vystavení laboratorním zdrojům světla – Část 2: Xenonové lampy. Ozáření bylo realizováno kontinuálně celkově 1000 hodin ozařování, po 200 hodinách byl vždy vzorky vystaveny 24 hodinám tmy.



Obrázek 16 Solarbox 1500. Zdroj: <http://kscientific.tradeindia.com/solarbox-weatherometer--754911.html>.

2.3.3 Požární odolnost

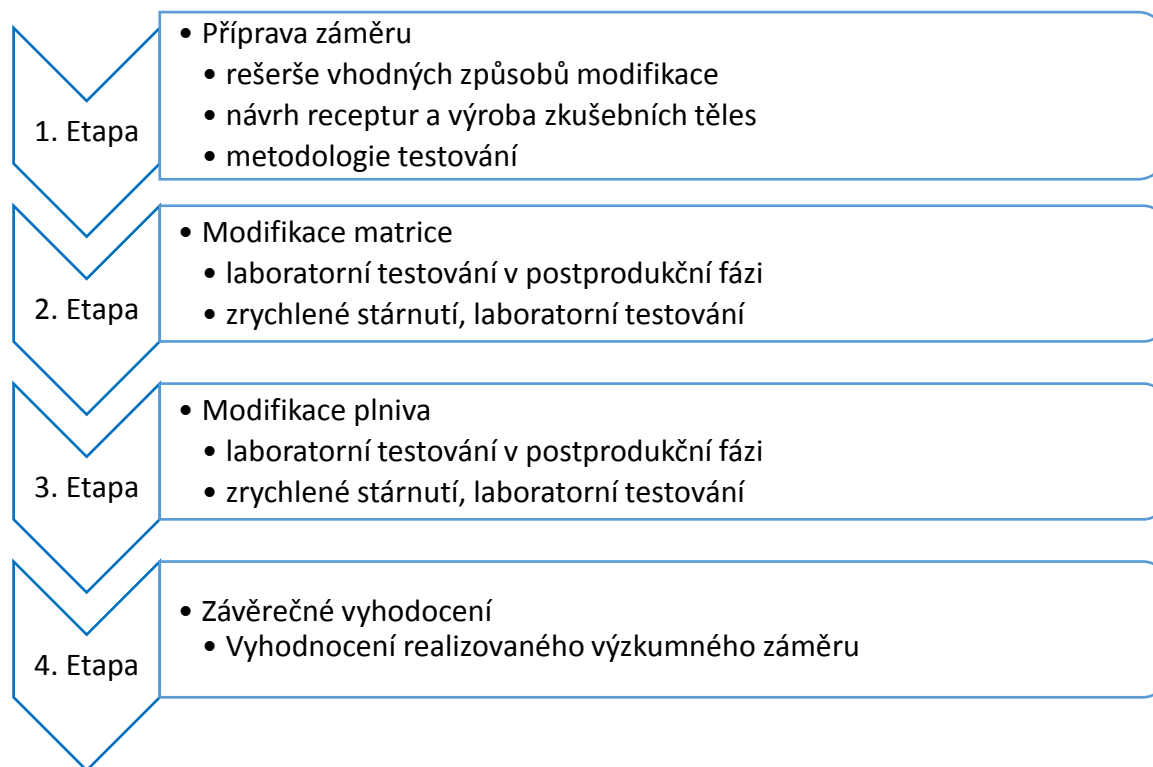
Požárně-technická charakteristika zkoušených vzorků byla provedena dvěma specifickými zkušebními metodami – stanovením hořlavosti prostřednictvím kyslíkového čísla (dle to ČSN EN ISO 4589-2 Plasty – Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla Část 2: Zkouška při teplotě okolí) a hodnocení vznětlivosti (dle národní normy ČSN 64 0149 Stanovení vznětlivosti materiálů). Vyhodnocení hořlavosti bylo provedeno s ohledem na požadavky vstříkolisovaných polymerních materiálů. Požární odolnost byla zkoušena na zvláštní skupině zkušebních těles vyrobených metodou termolisování a nařezaných na požadované rozměry $100 \times 10 \times 4 \text{ mm}$ dle ISO 4589-2. Na těchto zkušebních tělesech byly stanoveny požární vlastnosti zahrnující hodnocení kyslíkového čísla a vznětlivosti.

Stanovení kyslíkového čísla dle příslušné normy se stanoví jako minimální objem kyslíku ve směsi kyslík / dusík, který je nutný pro udržování hoření materiálu. Čím vyšší tento podíl je, tím je materiál považován za odolnější. Při zkoušce je zkušební těleso umístěno vertikálně do trubice, jíž proudí směs plynu ve směru jeho délky. V rámci zkoušky je realizováno měření na sérii zkušebních těles při různých koncentracích kyslíku ve směsi plynu.

Stanovení vznětlivosti bylo provedeno jako teplota vzplanutí zkušebního tělesa. Ta je definována jako nejnižší teplota směsi plynu proudící trubicí podél zkušebního tělesa, při níž dojde ke vzplanutí materiálu. Zkouška se provádí ve zkušební peci. Zkušební těleso je po dobu 15 min zahříváno konstantní teplotou a konstantní rychlostí proudění vzduchu. Po každém 15 minutovém cyklu je teplota zvýšena a vizuálně se stanoví bod vzplanutí odpovídající odečtené hodnotě teploty.

3 Metodika provedených prací

Realizace experimentální části byla rozdělena do čtyř etap, které popisují následující podkapitoly. Schematické znázornění náplně jednotlivých etap disertační práce uvádí následující Obrázek 17.



Obrázek 17 Schéma znázorňující náplň jednotlivých etap disertační práce

3.1 Etapa I – Příprava výzkumného záměru

První etapa řešení disertační práce byla zaměřená na provedení přípravných prací pro následné laboratorní testování. Tyto práce chronologicky zahrnovaly tři fáze – rešerši dostupných surovin pro oba typy modifikace, návrh složení receptur směsí včetně výroby zkušebních těles a definici vhodné metodiky zkoušení. V rámci této etapy proběhla také výroba zkušebních těles. Výroba zkušebních těles probíhala na dvou pracovištích, a to v laboratořích společnosti UNIPETROL RPA, s.r.o. provozovně Polymer Institute Brno a v laboratořích Fakulty Chemické Vysokého učení technického v Brně. Přípravná část disertační práce byla chronologicky rozdělena do následujících fází.

Rešerše dostupných surovin

První fáze řešení disertační práce se zaměřovala především na volbu vhodných surovin pro výrobu dřevoplastového kompozitu. Realizace této fáze spočívala v posouzení vlivu různých typů modifikačních elementů, tedy recyklovaného polymeru, příměsí a filerů, matrice

nebo plniva pro dřevoplastový kompozit, kterými by bylo dosaženo primárních cílů modifikace, a to zejména zlepšení uživatelských vlastností materiálu a snížení environmentálního dopadu jeho výroby. Posouzení bylo provedeno na základě komplexní studie odborné literatury zabývající se možnostmi modifikace složení surovinové směsi dřevoplastového kompozitu. Volba modifikujícího prvku zohledňovala především nutnost využití takové druhotné suroviny, která je běžně dostupná v komerčních podmínkách trhu, a která zároveň nevyžaduje integraci mezikroků produkce, jež by se nutně promítly do finančních, energetických a časových nároků jejího provedení. Současně s volbou modifikujícího prvku byly s ohledem na studie posuzované v rámci rešerše identifikovány signifikantní veličiny charakterizující vliv modifikace na vlastnosti kompozitu a vybrány vhodné metodické postupy jejich zkoušení.

Návrh receptur a výroba zkušebních těles

Na základě výstupů rešerše, jimiž byly stanoveny dva typy způsobu modifikace dřevoplastového kompozitu druhotnými surovinami, byly následně navrženy receptury směsí pro výrobu zkušebních těles, které obsahovaly variabilní podíl modifikujícího prvku. Vzhledem k nutnosti optimalizovat množství modifikujícího prvku tak, aby byly minimálně zachovány aplikační a provozní vlastnosti nemodifikovaného kompozitu, směřoval návrh receptur k obsažení celého spektra možných odchylek vlastností, a podíl modifikujícího prvku tak byl odstupňován po celém obsahu modifikované složky kompozitu. Hlavním záměrem bylo v tomto směru stanovit relativní vztahovou závislost velikosti podílu modifikujícího prvku a klíčových vlastností kompozitu.

V této fázi přípravné etapy byla na základě navržených receptur vyrobena zkušební tělesa. Vzhledem k absenci vhodného zařízení probíhala homogenizace směsí i následná výroba zkušebních těles v laboratořích spřízněných institucí (Polymer Institute Brno a FCH VUT v Brně). Ta zahrnovala dva typy zkušebních těles – standardizovaná vstřikovaná zkušební tělesa typu 1B dle ČSN EN ISO 527 a zkušební tělesa pro zkoušení požární odolnosti, která byla vylepšena retardérem hoření a připravená termolisováním, a následným nařezáním na požadovaný tvar a velikost.

Návrh metodiky testování

V rámci této fáze byly zvoleny konkrétní postupy a časový rámec laboratorního testování zkušebních těles, které vycházely z výstupů rešerše odborných zdrojů. Navržené zkušební postupy byly v souladu s cíli záměru a orientovaly se na stanovení hodnot klíčových vlastností kompozitu s ohledem na jeho uplatnění jako alternativy rostlého dřeva v exteriéru.

Z tohoto důvodu byly do hodnocení zařazeny zkoušky zrychleného stárnutí dvěma základními nepříznivými faktory, a sice vlhkostí včetně souvisejících vlivů charakteristických pro dané klima (s výrazným impaktem na chování plniva) a slunečním zářením (s výrazným impaktem na vlastnosti matrice).

3.2 Etapa II – Modifikace matrice

Každý typ modifikace byl vzhledem k odlišnému zkušebnímu schématu testován separátně. Ve druhé etapě řešení výzkumného záměru disertační práce bylo provedeno laboratorní testování připravených zkušebních těles s variabilním podílem polymerního recyklátu (regranulátu) v matrici. Vzhledem k charakteru plniva bylo v této etapě ve spolupráci s Vysokou školou báňskou –Technickou univerzitou Ostrava provedeno rovněž posouzení vlastností materiálu při vystavení ohni, a dále posouzení vlivu přídatku UV stabilizátoru na vlastnosti kompozitu. Zkušební schéma bylo rozděleno na následující chronologicky navazující fáze.

Laboratorní zkoušení referenčních zkušebních těles (v postprodukčním stavu)

V této fázi byly provedeny základní laboratorní zkoušky a sekundární testování referenčních zkušebních tělesek s variabilním podílem regranulátu v matrici. Jednalo se o tyto zkoušky:

- Základní zkoušky:
 - Stanovení nasákavosti,
 - Stanovení tahové pevnosti,
 - Stanovení poměrného prodloužení,
 - Stanovení modulu pružnosti v tahu,
 - Stanovení pevnosti v ohybu,
- Sekundární testování:
 - Infračervená absorpční spektroskopie,
 - Rastrovací elektronová mikroskopie povrchu a lomových ploch.

Zrychlené stárnutí a zkoušení degradovaných těles

V této fázi byla část zkušebních těles z každé série vystavena vlivu nepříznivých podmínek dle předepsaného postupu. Jednalo se o expozici UV záření v ozařovací komoře ve výše popsaném kontinuálním režimu (viz kap. 2.3.2) a cyklické zatěžování expozicemi vlhkosti a změnám teploty (viz kap. 2.3.1). V průběhu testování byla ve stanovených časových periodách odebírána zkušební tělesa k provedení průběžných zkoušek vybraných veličin odpovídajících zkušebnímu schématu uvedenému v předchozím bodě.

3.3 Etapa III – Modifikace plniva

Předmětem třetí etapy výzkumného záměru bylo laboratorní testování zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s provedenou modifikací plniva ve variabilním podílu příměsí. Zkušební schéma této etapy bylo rovněž rozděleno do čtyř fází. Jednalo se o:

Laboratorní zkoušení referenčních zkušebních těles (v postprodukčním stavu)

V této fázi byly provedeny základní zkoušky a sekundární testování připravených referenčních zkušebních těles (dvou typů receptur) na základě následujícího zkušebního schématu:

- Základní zkoušky:
 - Stanovení nasákavosti,
 - Stanovení tahové pevnosti,
 - Stanovení poměrného prodloužení,
 - Stanovení modulu pružnosti v tahu,
 - Stanovení pevnosti v ohybu,
 - Stanovení požární odolnosti,
- Sekundární testování:
 - Infračervená absorpční spektroskopie,
 - Rastrovací elektronová mikroskopie povrchu a lomových ploch.

Zrychlené stárnutí a zkoušení degradovaných těles

Navazující fáze expozice zrychlenému stárnutí byla realizována obdobně jako u zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s modifikovanou maticí. Zrychlené stárnutí bylo v tomto případě aplikováno pouze na vstříkovaných tělesech bez přídavku retardéru hoření. Expozice nepříznivým podmínkám probíhala na základě stejného postupu jako v předchozí etapě, jednalo se o vystavení UV záření v ozařovací komoře ve výše popsaném kontinuálním režimu (viz kap. 2.3.2) a cyklické zatěžování vlivem vlhkosti a teploty (viz kap. 2.3.1). Pro stanovení průběžných hodnot sledovaných veličin byla zkušební tělesa odebírána ve stejných časových úsecích jako v předchozí etapě.

Požární odolnost

Kromě uvedeného zkušebního schématu byly v rámci třetí etapy provedeny dvě další posouzení. První z nich bylo zaměřeno na posouzení vlivu příměsí anorganického plniva na vlastnosti spojené s požární odolností materiálu, a to kyslíkového čísla (hořlavosti) a bodu vzplanutí (vznětlivosti). Posouzení bylo provedeno na základě hodnot naměřených v laboratořích VŠB-TUO.

UV stabilizace

Druhé posouzení modifikovaného materiálu bylo zaměřeno na stanovení vlivu anorganické příměsi na odolnost vůči UV záření. V tomto případě byla připraven zkušební tělesa obsahující UV stabilizační přísadu v obvyklém množství a bez přísady. Oba typy zkušebních těles byly vystaveny působení UV záření v ozařovací komoře, a následně byly srovnávány změny v chemické struktuře povrchových vrstev materiálu prostřednictvím Infračervené absorpční spektroskopie.

3.4 Etapa IV – Závěrečné vyhodnocení

V závěrečné etapě výzkumného záměru proběhlo vyhodnocení všech nasbíraných dat z provedených laboratorních zkoušek. Předmětem této etapy bylo provedení deskriptivní analýzy aplikačních vlastností dřevoplastového kompozitu modifikovaného vybraným způsobem, a následně komparativní analýzy hodnot zkušebních těles v postprodukčním (referenčním) a degradovaném stavu. Na základě provedených analýz bylo provedeno posouzení optimálního podílu recyklátu v matrici a příměsi plniva dřevoplastového kompozitu s ohledem na požadavky aplikace konečného produktu.

4 Výsledky experimentálních prací v rámci jednotlivých etap

Výstupy jednotlivých etap řešení výzkumného záměru disertační práce jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

4.1 Etapa I – Příprava výzkumného záměru

Jak bylo uvedeno v předchozím textu, první etapa řešení výzkumného záměru byla rozdělena do tří fází, které zahrnovaly:

- rešerši dostupných surovin,
- návrh receptur a výrobu zkušebních těles,
- návrh metodiky zkušebních schémat.

Výsledky první etapy řešení výzkumného záměru jsou přehledně shrnuty v navazujícím textu.

4.1.1 Rešerše dostupných surovin

Primárně byly zvoleny základní složky dřevoplastového kompozitu, které tvořily surovinovou směs referenčního nemodifikovaného kompozitu. Jako základní matrice byl zvolen polypropylénový kopolymer, který je běžně v této aplikaci uplatňován a vyznačuje se dobrou odolností vůči venkovním podmínkám (zejména mrazu). Jako plnivo byla zvolena dřevní moučka ze směsi jehličnanů.

Posouzení vhodnosti modifikujících surovin bylo provedeno na základě studia odborných publikací, které je podrobněji rozvedeno v kapitolách 2.1 a 2.2 zabývajících se možnostmi provedení modifikace. V návaznosti na vyhodnocení výstupů rešerše byly zvoleny požadavky na modifikující prvky, na jejichž základě byly dále zvoleny druhotné suroviny pro provedení modifikace kompozitu.

Modifikace matrice

Modifikace matrice dřevoplastového kompozitu je obvykle realizována jako její celková náhrada. Nejčastěji se využívá recyklát z obalového zboží mající zpravidla charakter směsného polymeru (polyetylen / polypropylen) o variabilním poměru složek. Druhotná surovina může obsahovat vysoký poměr různých reziduí a nečistot, které zhoršují provozní vlastnosti kompozitu, a zároveň jsou zpravidla zbarveny, což je nepříznivé pro předpokládanou aplikaci v podobě prvků decking systému, jehož hlavní výhodou je senzorická příbuznost s masivním dřevem. Z tohoto důvodu byly stanoveny následující požadavky na vlastnosti modifikujícího polymeru:

- recyklovaný polymer bude dodán ve formě regranulátu, aby bylo zajištěno, že výrobní proces nebude rozšířen o další mezikrok náročný energeticky, časově a také s ohledem na lidské zdroje a investici do nového zařízení,
- chemické složení recyklátu není směsné, jedná se o polypropylen,
- recyklát neobsahuje vyšší podíl pigmentu ani jiných přísad s pigmentovým charakterem,
- regranulát je běžně komerčně dostupný.

Modifikace plniva

Modifikaci výztužné složky dřevoplastového kompozitu lze provést dvěma způsoby, a to jako náhradu části dřevní hmoty tvořící plnivo vláknovou nebo částicovou příměsí o velikosti částic v řádu mikrometrů, jejíž přídavek se pohybuje ve vysokém podílu směsi kompozitu (řádově desítky %), nebo jako náhradu části matrice nanočásticovou příměsí, jejíž přídavek se pohybuje v jednotkách %. Jelikož příprava kompozitu s nanočásticovou příměsí vyžaduje zahrnutí mezikroku výroby spojeného s nutností separátní homogenizace s matricí, bylo rozhodnuto, že modifikujícím prvkem bude mikročásticové plnivo. Z dostupných zdrojů se jako vhodné jeví dva typy anorganických příměsí – odpadní sklo a popílek. Příprava odpadního skla do granulometrie požadované pro správné působení ve struktuře kompozitu by znamenala další výrobní mezikrok mletí. Kvůli vysoké tvrdosti této druhotné suroviny lze navíc předpokládat vysoké riziko rychlého opotřebení zařízení pro mletí, homogenizaci a výrobu konečného produktu. Z tohoto důvodu byl jako modifikující prvek vybrán popílek s nižší tvrdostí, který je obvykle dodáván v požadované granulometrii.

Na výběr základních i modifikujících surovin navázalo zadání poptávky a návrh testovaných receptur.

4.1.2 Návrh receptur a výroba zkušebních těles

Pro přípravu zkušebních těles byly navrženy čtyři typy receptur, použité suroviny uvádí Tabulka 3. Složení surovinových směsí je uvedeno v příslušných tabulkách:

- referenční receptury, označení Ref
- receptury zkušebních těles s modifikovanou maticí, označení MM (Tabulka 4)
- receptury zkušebních těles s modifikovaným plnivem, označení MP (Tabulka 5)
- receptury pro zkušební tělesa určená ke zkoušení požární odolnosti, označení PO (Tabulka 6).

Tabulka 3 Suroviny použité k přípravě receptur zkušebních těles.

Složka	Popis
IC4x 2010	polypropylen Mosten GB 504 – houževnatý blokový kopolymer, MFI 230°C/2,16 4g/10min, teplota tání 150°C
recyklát Kordplast	recyklovaný polypropylen – homopolymer, MFI 230°C/2.16 6.1g/10min, teplota tání 145°C
dřevitá moučka B2 sušená	polohrubá, výrobce – NATE, s.r.o., Mlýn-Bělkovice
Licomont AR 504	Kompatibilizér
Irganox B225	vosk, tepelný stabilizátor
Chimassorb 944	UV-stabilizační přísada
popílek Rybník	polský původ, elektrárna Rybník
Exolit 752 (Carliath)	Retardér hoření intumescentní, výrobce – Carliath

Tabulka 4 Receptury zkušebních těles s modifikovanou maticí.

Složka	Označení vzorku			
	RefMM	MM15	MM27	MM55
PP Mosten GB 504 [%]	55	40	27.5	0
PP regranulát Kordplast [%]	0	15	27.5	55
Dřevní moučka B2 [%]	40	40	40	40
Přísady (kompatibilizér, vosk, UV stabilizátor) [%]	5	5	5	5

Tabulka 5 Receptury zkušebních těles s modifikovaným plnivem.

Složka	Označení vzorku			
	RefMP	MP7	MP15	MP30
PP Mosten GB 504 [%]	66	66	66	66
Dřevní moučka B2 [%]	30	22,5	15	0
Popílek Rybník [%]	0	7,5	15	30
Přísady (kompatibilizér, vosk) [%]	4	4	4	4

Tabulka 6 Receptury pro zkušební tělesa určená ke zkoušení požární odolnosti.

Složka	Označení vzorku			
	RefPO	PO4	PO9	PO18
PP Mosten GB 504 [%]	49.5	49.5	49.5	49.5
Dřevní moučka B2 [%]	36	31.5	27	18
Popílek Rybník [%]	0	4.5	9	18
Přísady (kompatibilizér, vosk, retarder hoření) [%]	14.5	14.5	14.54	14.5

Výroba zkušebních těles

Výroba zkušebních těles zahrnovala dva specifické kroky. Prvním z nich byla homogenizace, jež byla provedena na jednošnekovém extruderu se specifickým pracovním režimem a integrovaným vynášecím šnekem BUSS MDK 46 (Obrázek 18). Směsi byly do extrudéru dávkovány manuálně předmíchané. Nejvyšší teplota v prvním pásmu dosáhla 167°C, ve druhém pásmu 152°C. Úhlová rychlost šneku pro homogenizaci dosáhla 10 ot/min, u vynášecího šneku 6 ot/min. Celkový výkon extrudéru byl 10 kg/h homogenizovaného granulátu. Granulace kontinuálního pásu byla provedena na navazující granulovačce.



Obrázek 18 Jednošnekový extrudér BUSS MDK 46 s dávkovacím zařízením, chladicí vanou a granulovačkou (vlevo), nože granulovačky (vpravo).

Pro potřeby všech zkoušek s výjimkou hodnocení požárně-technických vlastností byla připravena zkušební tělesa typu 1B dle požadavků normy ČSN EN ISO 527. Tělesa byla vyrobena injekčním vstřikováním na vstřikolisu Arburg (viz Obrázek 19). Vyrobena zkušební tělesa typu 1B uvádí navazující Obrázek 20.



Obrázek 19 Forma vstřikolisu Arburg s výliskem referenčních zkušebních těles.



Obrázek 20 Zkušební tělesa typu 1B dle ČSN EN ISO 527.

Zkušební tělesa pro stanovení požární odolnosti byla připravena lisováním v rozebíratelné formě při nárůstu teploty do 185°C a postupném klesání tlaku ze 100 kN (výdrž 5 min) do 40 kN. Poté následovalo chlazení na 40°C za udržování tlaku. Při dosažení teploty 40°C bylo po uplynutí periody výdrže (5 min) provedeno odtížení a vyjmutí těles. Před zahájením výroby bylo nutné výrobní formu vždy opatřit separační vrstvou pro odformování. Jako separace byl použit nástřík Lusin Alro OL 151. Celkový čas výroby jedné desky byl přibližně 40 min. Po odformování byla deska nařezána pásovou pilou na požadované rozměry 100×10×9 mm. Zkušební tělesa vyrobená pro zkoušky požární odolnosti jsou uvedena na následujícím obrázku (Obrázek 21).



Obrázek 21 Zkušební vzorky pro stanovení požární odolnosti.

4.1.3 Metodika zkoušek

Metodické postupy zkoušení jednotlivých typů zkušebních těles vyrobených z navržených receptur vycházely z provedené rešerše a zaměřovaly se na zkoušení klíčových fyzikálních, fyzikálně mechanických a strukturálních vlastností. Vzhledem k aplikaci v exteriéru zahrnovaly také testy zrychleného stárnutí. Podrobný popis jednotlivých zkoušek a zkušebních postupů je uveden v kap. 2 experimentální části disertační práce.

4.2 Etapa II – Modifikace matrice

Realizace druhé etapy výzkumného záměru byla rozdělena do dvou navazujících fází. Výstupy obou fází jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

4.2.1 Laboratorní zkoušení zkušebních těles v postprodukčním stavu

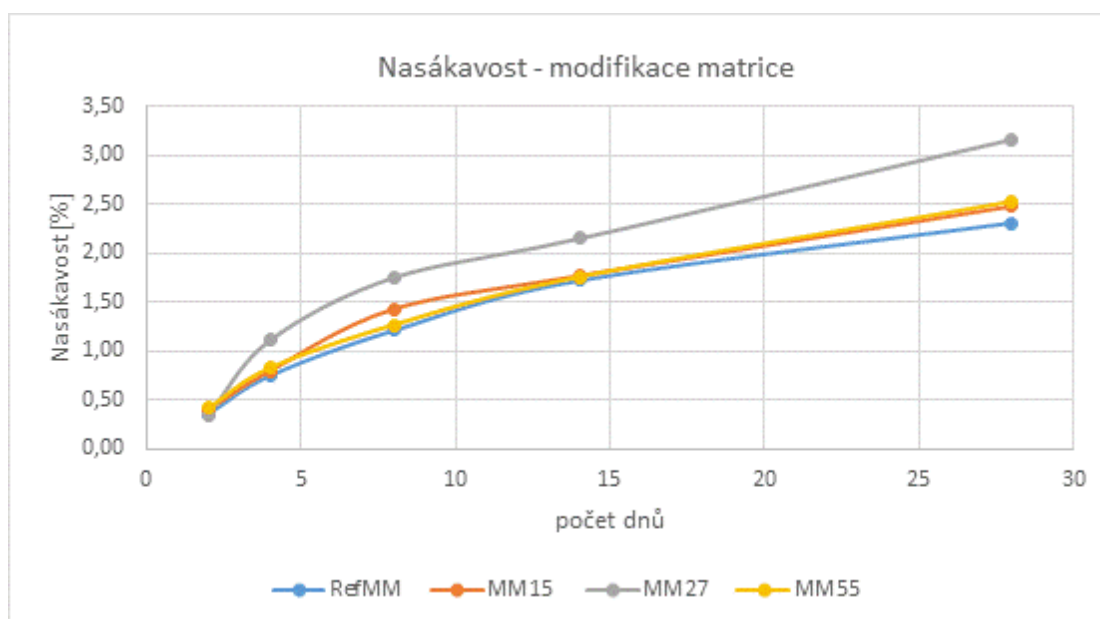
V první fázi byly základní laboratorní testy provedeny na zkušebních tělesech nezátížených expozicí nepříznivým podmínkám simulujícím aplikaci v exteriéru. Zvolené polymery pro matrici kompozitu byly rozdílného charakteru – primární polymer byl vybrán na základě běžné praxe, jednalo se o blokový kopolymer, který se obecně vyznačuje nižšími pevnostními charakteristikami a vyšší odolností v mrazu, komerčně dostupný recyklát byl homopolymer dosahující vyšších pevností v postprodukčním stavu, ovšem podléhající ve větší míře působení vlhkosti a nižších teplot. Chování kompozitu bylo sledováno ve variabilním přídatku (náhrada 27 a 50 %) a při celkové náhradě podílu matrice. Výstupy jednotlivých zkoušek jsou uvedeny v textu níže.

Stanovení nasákavosti

Nasákavost zkušebních těles byla stanovena ponořením do destilované vody. Hodnoty byly odečítány v intervalu po 2, 4, 8, 14 a 28 dnech. Vyhodnocení nasákavosti uvádí následující Tabulka 7 a Graf 38.

Tabulka 7 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem.

Nasákavost (počet dnů)	RefMM	MM15	MM27	MM55
	[%]			
2	0,36	0,40	0,35	0,42
4	0,75	0,80	1,11	0,83
8	1,21	1,43	1,75	1,27
14	1,72	1,77	2,15	1,76
28	2,31	2,48	3,16	2,53



Graf 38 Nasákavost vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem: RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu.

Jak je patrné z hodnot, které uvádí Tabulka 7, a trendů průběhu, které zobrazuje Graf 38, na zkušebních tělesech obsahujících přídavek recyklátu v matrici se projevila jeho citlivost k vlhkosti dána charakterem polymeru. Vzorky z primárního polymeru dosáhly nejnižších hodnot nasákavosti, která se po 28 dnech expozice zvýšila o 84 % k původní hodnotě stanovené po dvou dnech, celková nasákavost však dosáhla pouze 2,31 %. Dobrých výsledků dosáhla také zkušební tělesa s celkovou náhradou polymerní matrice recyklátem (MM55), nasákavost se po 28 dnech v porovnání s původní hodnotou po dvou dnech zvýšila o 83 %. Původní hodnota po dvou dnech, stejně jako konečná hodnota nasákavosti, však byly vyšší a činily 0,42 resp. 2,53 %. Obdobné chování pod zatížením vlhkostí vykazala i zkušební tělesa s 15 % podílem recyklátu.

Nejvyšší nasákavost byla dosažena u zkušebních těles obsahujících poloviční podíl recyklátu v matrici. Tento jev je připisován rozdílné teplotě tání obou polymerů, která může u směsných polymerů zapříčinit imperfekce ve struktuře a síťování makromolekul nerovnoměrnou krystalinitou při ochlazování. Různá teplota tání polymerů ve směsi vedla k nedostatečné homogenizaci a tedy i obalení zrn plniva, které je tak snadněji dostupné pro vnik vody a její interakci s buněčnými stěnami dřevní moučky.

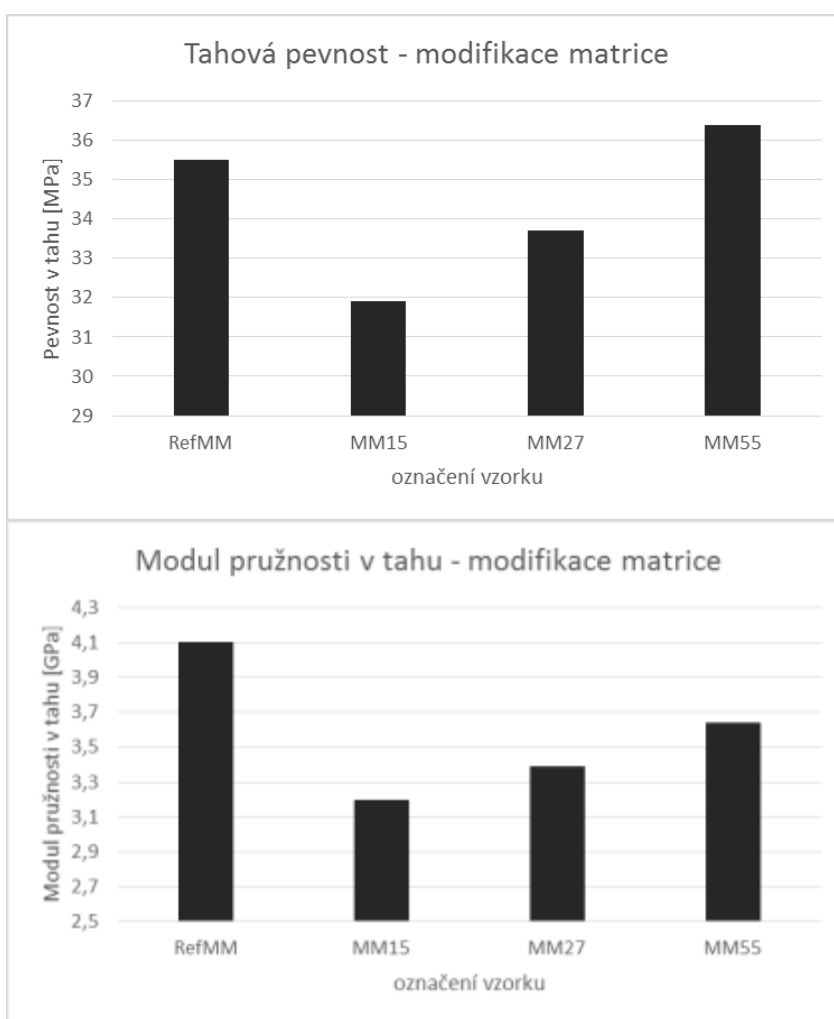
Fyzikálně mechanické vlastnosti – tahové charakteristiky

V rámci fyzikálně mechanických vlastností se hodnocení vyrobených zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s částečnou nebo úplnou náhradou primárního polymeru matrice regranulátem zaměřovalo na stanovení tahových charakteristik a ohybové pevnosti.

Vyhodnocení tahových charakteristik uvádí následující Tabulka 8 a grafy (Graf 39 a Graf 40).

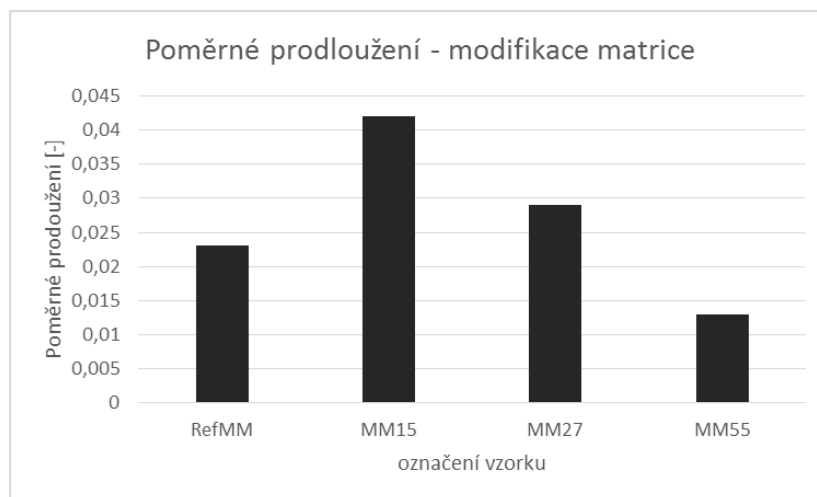
Tabulka 8 Vyhodnocení pevnosti v tahu, modulu pružnosti a poměrného prodloužení zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem.

Označení vzorku	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení
	[MPa]	[GPa]	[-]
RefMM	35,5±0,813	4,10±0,096	0,023
MM15	31,9±0,872	3,20±0,102	0,042
MM27	33,7±0,920	3,39±0,047	0,029
MM55	36,4±0,671	3,64±0,135	0,013



Graf 39 Pevnost v tahu (nahore) a modul pružnosti (dole) vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem:

RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu.



Graf 40 Poměrné prodloužení vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem: RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regenerulátu, MM27 – s 27,5% podílem regenerulátu, MM55 – s matricí z regenerulátu.

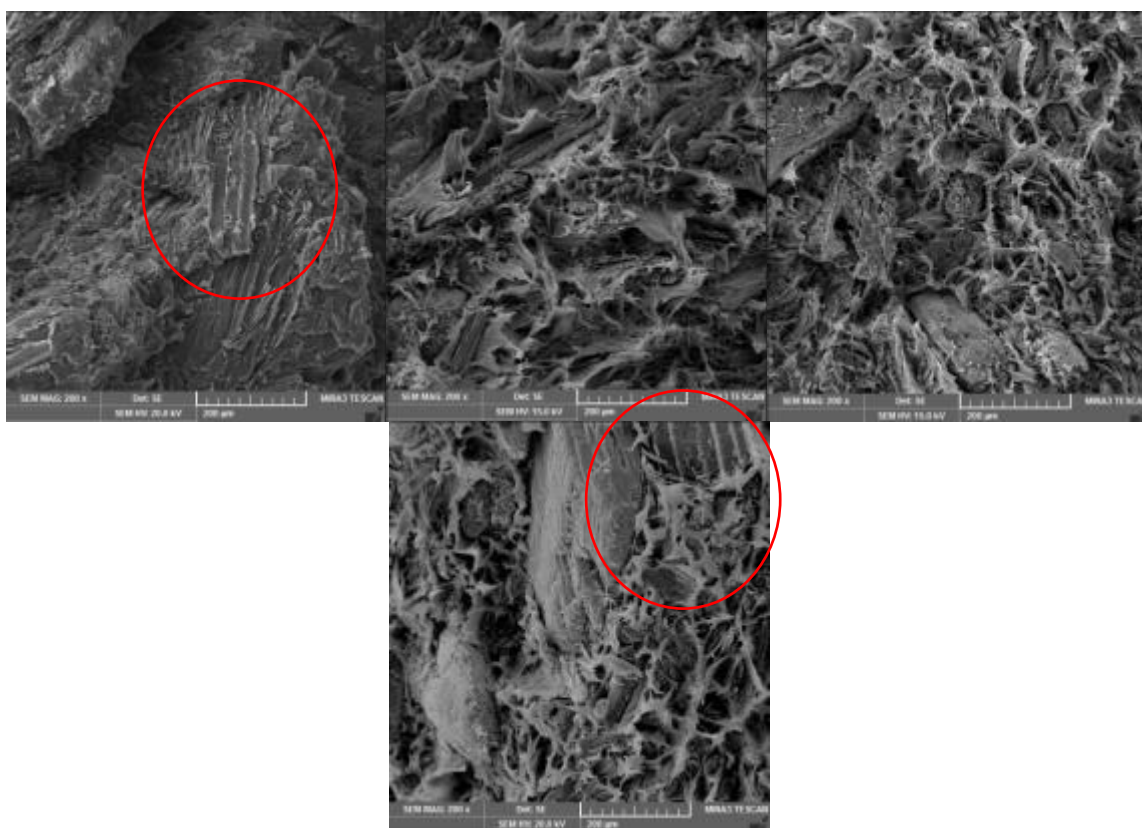
Vyhodnocená tahových charakteristik, tedy pevnosti a modulu pružnosti, poukázalo na obdobný trend. U zkušebních těles připravených z primárního polymeru přeneslo značnou část zatížení plnivo, na což lze usuzovat s ohledem na základní pevnost v tahu v postprodukčním stavu, která dosáhla více než 35 MPa. To je o 40 % více než je deklarovaná tahová pevnost neplněného polypropylenu daného typu (25 MPa). Pozitivní vliv plniva se projevil také u zkušebních těles s matricí vyrobenou pouze z regenerulátu. Deklarovaná pevnost v tahu neplněného recyklovaného polymeru v tomto případě činí 35 MPa.

Kompozitní zkušební tělesa, u nichž byla primární matrice nahrazena recyklátem z části (15 a 27,5 % celkového objemu směsi), dosáhla i přes stejný podíl vláknitého plniva výrazně nižších tahových charakteristik. Tento trend je rovněž připisován imperfekcím v homogenitě polymeru. Rozdílná krystalinita složek směsného polymeru způsobuje rozfázování jeho struktury, což ovlivňuje nedostatečné obalení zrn plniva, které tak zcela nepřenáší zatížení vyvíjené na kompozit. Vyšší hodnota u zkušebních těles s matricí tvořenou z 50 % recyklátem je způsobena celkovou deklarovanou vyšší tahovou pevností polymeru. U těchto zkušebních těles přenáší větší část zatížení matrice.

Popsaný trend lze pozorovat také u modulu pružnosti. Odchylnou hodnotu vykazuje vzorek s matricí z recyklovaného polymeru, který dosáhl nižších úrovně než u vzorků z primárního polypropylenu. Tato skutečnost je dána pomalejším nárůstem pevnosti zkušebního tělesa, jelikož modul pružnosti je stanoven z napětí v počátečních hodnotách deformace. Deklarovaná hodnota modulu pružnosti neplněného polymeru nebyla ale v rámci záměru stanovena, lze ovšem předpokládat, že byla nižší než u použitého typu primárního polymeru.

Výsledkům postprodukčního testování tahové pevnosti a modulu pružnosti odpovídá i stanovené poměrné prodloužení při porušení zkušebních těles. Vzorky s jednodruhovou maticí (tzn. buď pouze z primárního polymeru nebo z regranulátu) dosáhly nižších hodnot poměrného prodloužení, z čehož lze usuzovat na dobré spolupůsobení plniva a matrice, které přenáší větší část zatížení. Vyšší hodnota poměrného prodloužení u zkušebních těles se směsnou maticí svědčí o nižší interakci mezi maticí a plnivem, neplněné polymery se obvykle vyznačují vyššími hodnotami poměrného prodloužení.

Pro posouzení morfologie zkušebních těles byla použita rastrovací elektronová mikroskopie lomových ploch zkušebních těles (viz Obrázek 22). Snímky dokazují převážný přenos zatížení – u zkušebních těles s jednodruhovou maticí (RefMM – nahoře vlevo a MM55 – dole) je patrné porušení v plnivu, tedy podél vláken dřevní moučky (označeno červenými kružnicemi). U zkušebních těles se směsnou maticí je plnivo převážně neporušeno a výrazněji se vyskytují *vějířky*, tedy porušení matrice.

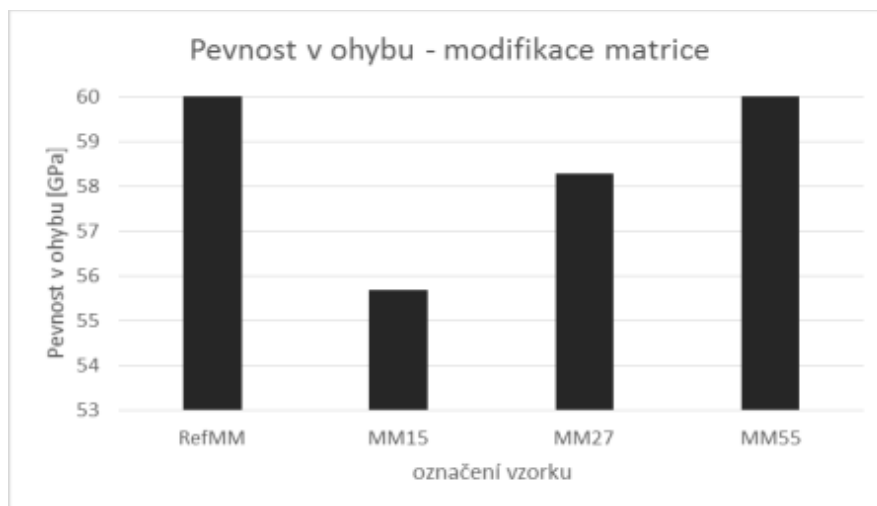


Obrázek 22 SEM snímky lomové plochy zkušebních těles při 200× zvětšení: RefMM (nahore vlevo), MM15 (nahore uprostřed), MM27 (nahore vpravo) a MM55 (dole).

Současně s tahovými charakteristikami bylo provedeno také stanovení ohybové pevnosti, která definuje chování materiálu při využití pro podlahové dílce. Hodnoty ohybové pevnosti uvádí následující Tabulka 9 a Graf 41.

Tabulka 9 Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem.

Označení vzorku	Modul pružnosti
	[GPa]
RefMM	66,91±0,615
MM15	55,7±2,090
MM27	58,3±0,803
MM55	65,1±0,700

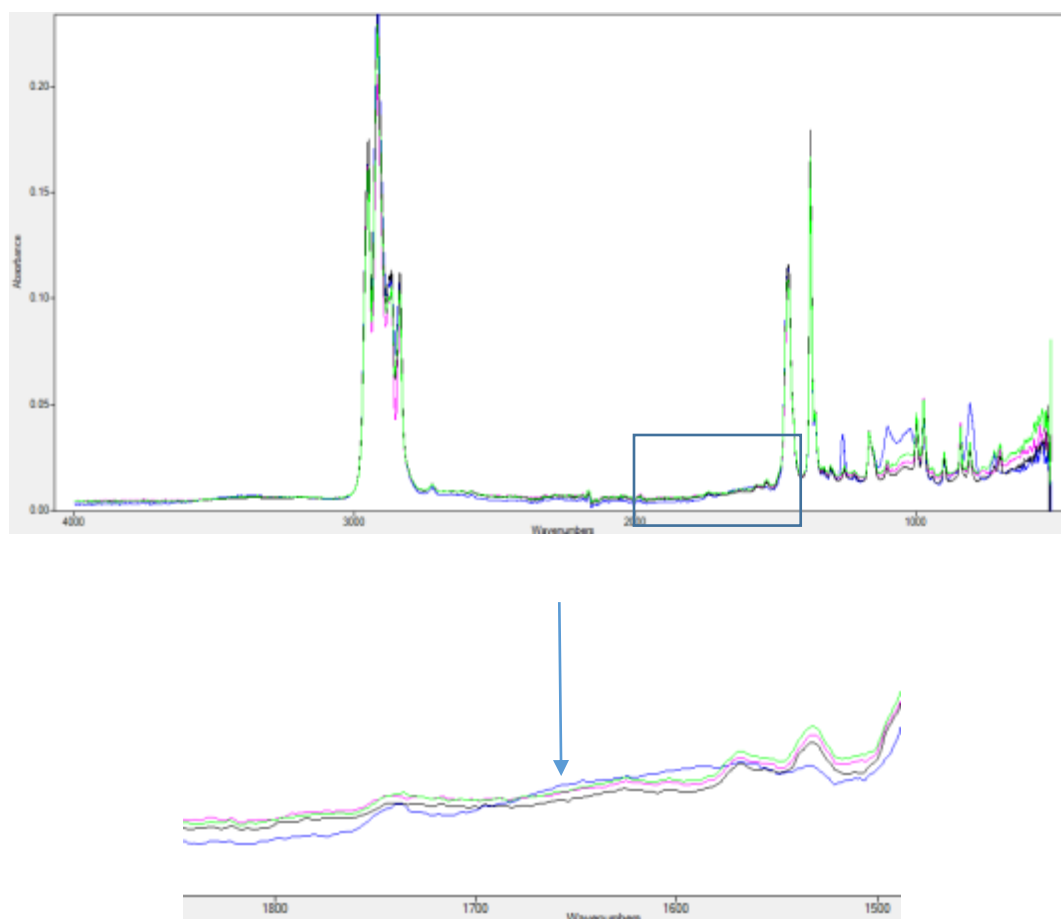
**Graf 41** Pevnost v ohybu vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem: RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Pevnost v ohybu vykazala obdobný trend jako tahové charakteristiky, z něž je patrný vliv podílu regranulátu v matrici a její morfologie na vlastnosti kompozitu v postprodukčním stavu. Obdobně jako u tahové pevnosti, i u pevnosti v ohybu dosáhla nejvyšších hodnot zkušební tělesa vyrobená z primárního polypropylenem, u nichž byla velká část zatížení přenesena plnivem.

Chemická struktura zkušebních těles byla v rámci základního testování stanovená prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie na vzorcích v postprodukčním stavu. Získané spektrogramy a jejich srovnání uvádí následující Spektrogram 5, přičemž oblast 1800-1680 cm^{-1} , kde by se měly nacházet spektrální pásy rozštěpených řetězců, které jsou projevem Norishových reakcí, je zvýrazněna a zvětšena. Z průběhu křivek lze odvodit mírný nárůst intenzity spektrálního pásu u zkušebních těles s matricí z regranulátu. U spektrogramu zkušebního tělesa s matricí z regranulátu lze nalézt zvýšení intenzity na vlnočtech 1257, 1000-1168 a 897 cm^{-1} . Tyto vlnočty odpovídají vibracím dřevní hmoty, lze tedy předpokládat, že v místě odběru spektrogramu se nacházelo odhalené zrno plniva. Spektrogramy obsahují převážně pásy polypropylenem, které se vyskytují na vlnočtech uvedených následující tabulce (Tabulka 10).

Tabulka 10 Spektrální pásy dřevoplastového kompozitu s polypropylenovou maticí

Vlnočet [cm^{-1}]	Vazba, vibrace
Polypropylen	
2952, 2918, 2838	C-H valenční vibrace
2720	CH deformační a CH ₃ valenční vibrace
1456	CH ₃ asymetrická valenční vibrace
1376	CH ₃ symetrická valenční vibrace
1165	deformační vibrace terciárního uhlíku
974, 841, 808	C-H deformační vibrace
Dřevní hmota	
3400	O-H valenční vibrace
3000-2800	C-H valenční vibrace v metylových skupinách
1728	C=O valenční vibrace v karboxylových kyselinách
1650	volné O-H a konjugované C-O vazby
1606, 1511-1505	C=C valenční vibrace aromatického uhlovodíku ligninu
1462	CH ₂ deformační vibrace v ligninu a karbohydrátech
1375	C-H deformační vibrace v celulóze a hemicelulózách
1268	C-O valenční vibrace v ligninu
1163	C-O-C asymetrická valenční vibrace v celulóze
1059	C-O valenční vibrace v celulóze a hemicelulózách
897	C-H deformační vibrace v celulóze

**Spektrogram 5** Naměřené spektrum zkušebních těles s podílem regranulátu v matici (nahore) a označení oblasti běžného výskytu spektrálních pásů rozštěpených řetězců:

RefMM – pouze s primárním polypropylenem (zelený), MM15 – s 15% podílem regranulátu (černý), MM27 – s 27,5% podílem regranulátu (růžový), MM55 – s maticí z regranulátu (modrý)

4.2.2 Zrychlené stárnutí a zkoušení degradovaných těles

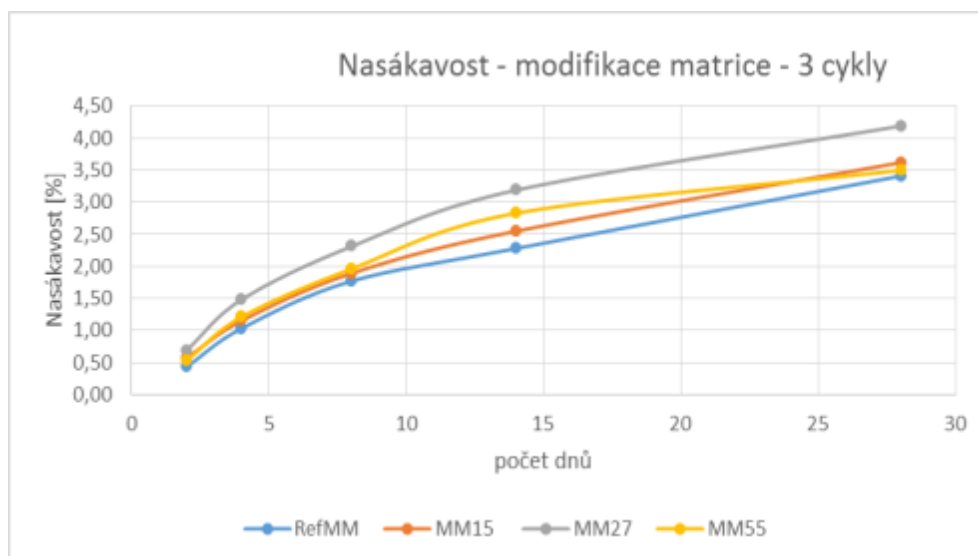
Zrychlené stárnutí bylo realizováno dvěma postupy – prostřednictvím cyklického zatěžování vlhkostí, mrazem a vysoušením (zvýšenou teplotou) po 3 a 9 cyklech a vystavením 1000 hodinám osvitů v UV komoře. Vyhodnocení sledovaných charakteristik je uvedeno v textu níže.

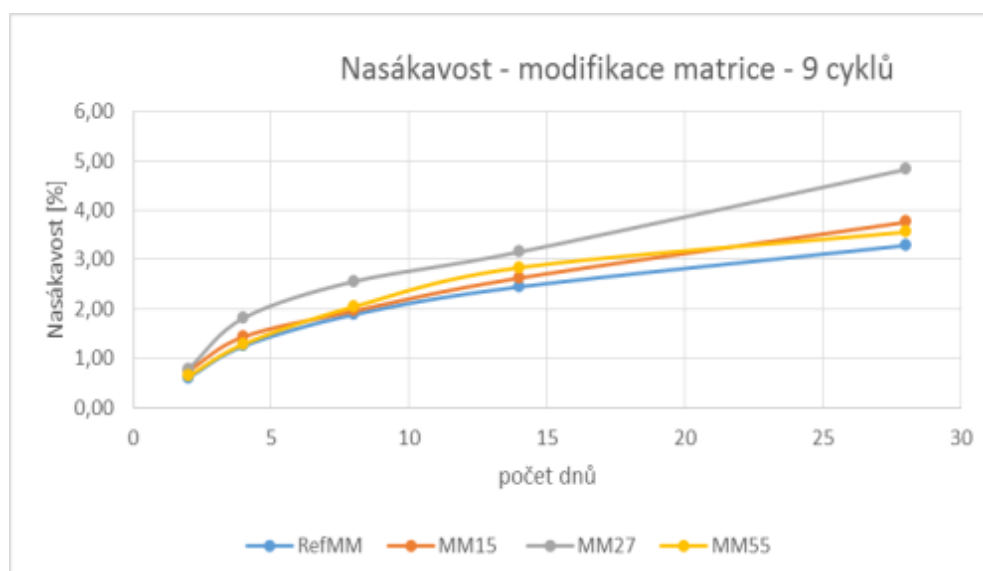
Cyklické zatěžování vlhkostí, mrazem a vysoušením

První charakteristikou sledovanou u degradovaných zkušebních těles byla nasákavost po 28 dnech. U degradovaných těles byla po skončení třetího a devátého cyklu stanovena nasákavost 2, 4, 8, 14 a 28 dnů. Výstupy zkoušek uvádí Tabulka 11 a Graf 42.

Tabulka 11 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem vystavených cyklické expozici vlhkosti, mrazu a vysoušení.

Nasákavost (počet dnů)	RefMM	MM15	MM27	MM55
	[%]	[%]	[%]	[%]
3 cykly				
2	0,43	0,57	0,69	0,53
4	1,03	1,15	1,48	1,21
8	1,77	1,89	2,31	1,96
14	2,28	2,55	3,19	2,83
28	3,41	3,62	4,19	3,50
9 cyklů				
2	0,61	0,75	0,79	0,64
4	1,25	1,44	1,82	1,29
8	1,89	1,96	2,56	2,05
14	2,45	2,63	3,16	2,84
28	3,29	3,76	4,83	3,56





Graf 42 Nasákavost zkušebních těles s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem po vystavení 3 a 9 cyklům expozice:

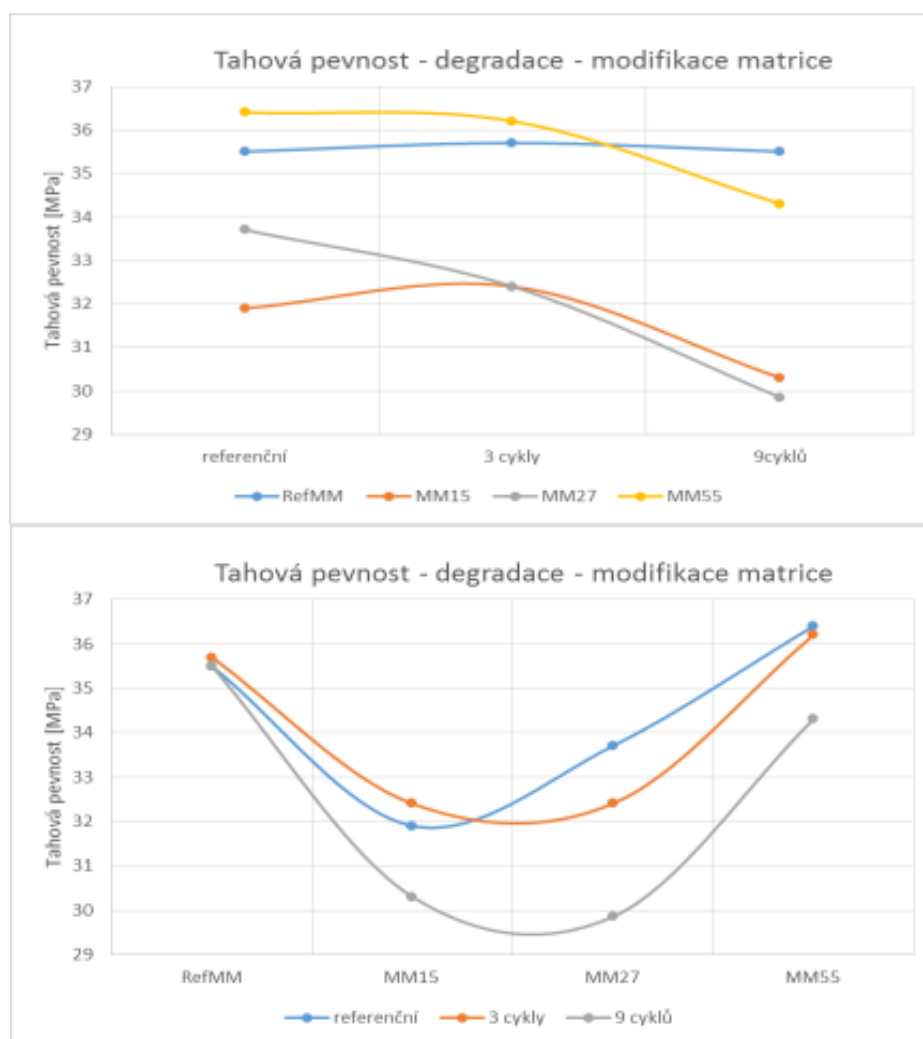
RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Nasákavost zkušebních těles po expozici degračními vlivům měla podobný průběh jako nasákavost stanovená v postprodukčním stavu. V 28 denním intervalu ponoření došlo k postupnému nárůstu nasákavosti jako po 3, tak po 9 cyklech degrační expozice, počáteční i konečné hodnoty nasákavosti byly u vzorků s delším vystavením degračním vlivům vyšší. Nejvyšších hodnot nasákavosti dosáhla zkušební tělesa se smíšenou matricí, po devíti cyklech se pohybovala kolem hodnoty 3,76 % u zkušebních těles s 15% podílem, resp. 4,83 % u zkušebních těles s polovičním podílem regranulátu v matrici.

Tahové charakteristiky degračních zkušebních těles byly posuzovány s ohledem na hodnoty stanovené u referenční sady vzorků zkoušených v postprodukčním stavu. Vyhodnocení zkoušek tahových charakteristik uvádí následující Tabulka 12 a ilustrují grafy (viz Graf 43, Graf 44 a Graf 45).

Tabulka 12 Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem.

Označení vzorku	Referenční			3 cykly			9 cyklů		
	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení
	[MPa]	[GPa]	[-]	[MPa]	[GPa]	[-]	[MPa]	[GPa]	[-]
RefMM	35,5±0,813	4,10±0,096	0,023	35,7±0,620	4,20±0,085	0,020	35,4±0,612	4,10±0,103	0,025
MM15	31,9±0,872	3,20±0,102	0,042	32,4±0,805	3,36±0,051	0,029	30,3±0,452	2,80±0,031	0,034
MM27	33,7±0,920	3,39±0,047	0,029	32,4±0,590	3,36±0,139	0,032	29,85±0,960	3,12±0,097	0,041
MM55	36,4±0,671	3,64±0,135	0,013	36,2±0,710	3,56±0,029	0,022	34,3±0,805	3,46±0,121	0,045



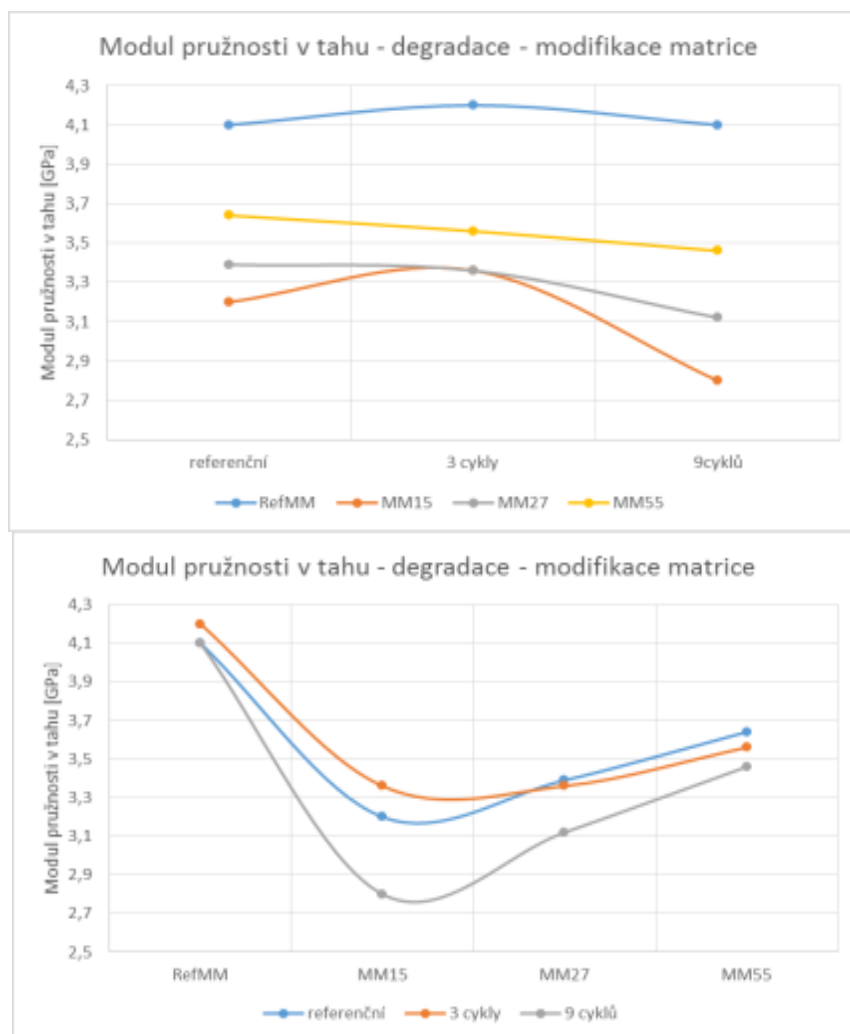
Graf 43 Tahová pevnost vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:

RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Tahová pevnost zkušebních těles vystavených nepříznivým podmínkám se projevila výrazným poklesem zejména u vzorků se směsnou matricí. Zkušební tělesa z primárního polymeru vykazovala stabilní hodnoty i po devíti cyklech expozice, což lze přičíst charakteru blokového polypropylenu s dobrou odolností vůči teplotním změnám včetně vystavení mrazu. Postupný pokles lze předpokládat až po delší expozici. Zkušební tělesa s matricí tvořenou pouze recyklátem dosáhla stabilních hodnot do 3. cyklu expozice, poté došlo k 5,8% poklesu v porovnání s původní hodnotou postprodukčního stavu. Vzhledem k nízkému rozsahu teplotní odolnosti homopolymeru lze předpokládat rychlejší průběh degradace při další expozici.

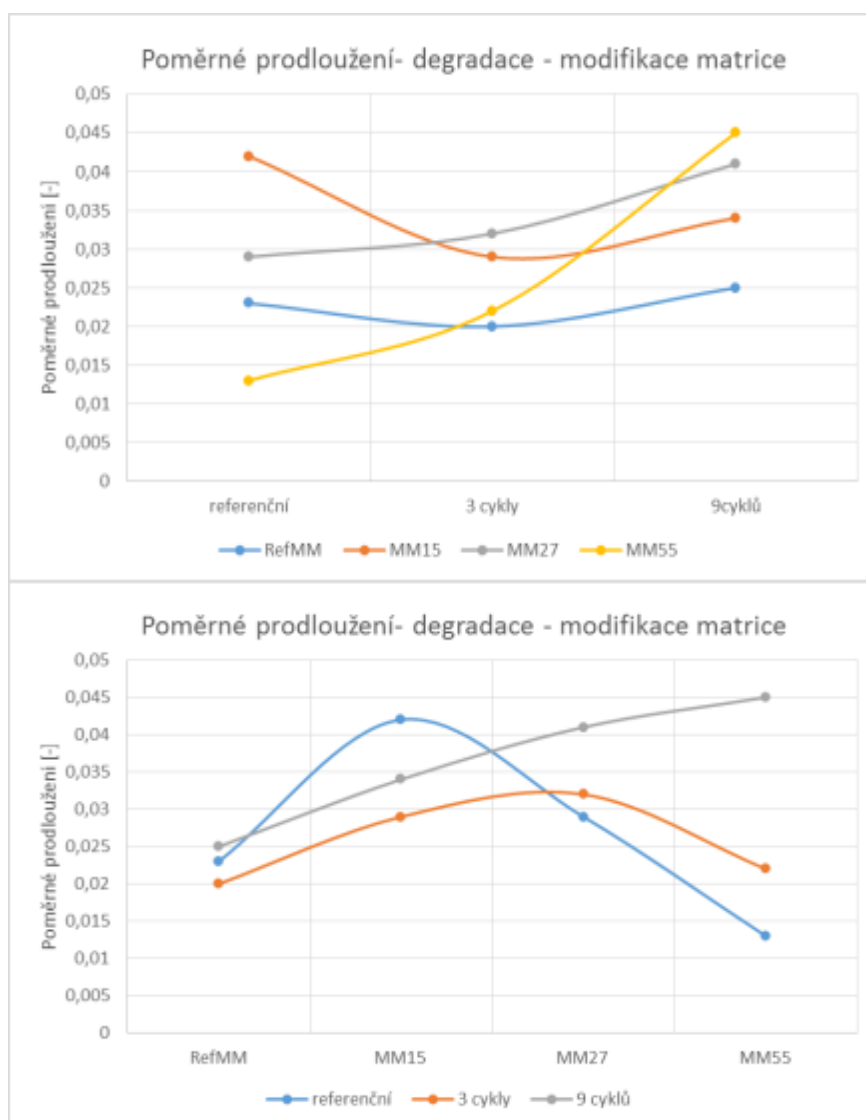
Výrazný pokles hodnot tahové pevnosti byl zaznamenán u obou typů zkušebních těles se směsnou matricí. Zkušební tělesa s 15% náhradou primárního polymeru recyklátem, obdobně jako zkušební tělesa s primárním polymerem, dosáhla po třech cyklech mírného nárůstu

hodnot tahové pevnosti, což lze přičíst postupnému dosítování polymeru, které po výrobě probíhá ještě v dalších týdnech, následná expozice však vedla k narušení dvoufázové struktury nehomogenní matrice, která se projevila zvýšeným bobtnáním plniva vedoucím k destrukci vazeb makromolekul. Hodnota tahové pevnosti u zkušebních těles s 50% náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem se tak po devíti cyklech expozice snížila o 11,4 %.



Graf 44 Modul pružnosti v tahu vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:
 RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Obdobný trend byl zaznamenán také u vývoje modulu pružnosti v tahu při expozici nepříznivým podmínkám. Hodnoty kompozitu s matricí z primárního polymeru zůstaly přibližně stabilní po celou dobu expozice. Modul pružnosti v tahu u zkušebních těles obsahujících podíl nebo úplnou matricí z recyklátu se projevil poklesem. Nejnižšího poklesu dosáhly vzorky s jednodruhovou matricí z recyklátu (přibližně 5 %), nejvyššího pak zkušební tělesa s 15% podílem recyklátu (až 12,5 %).



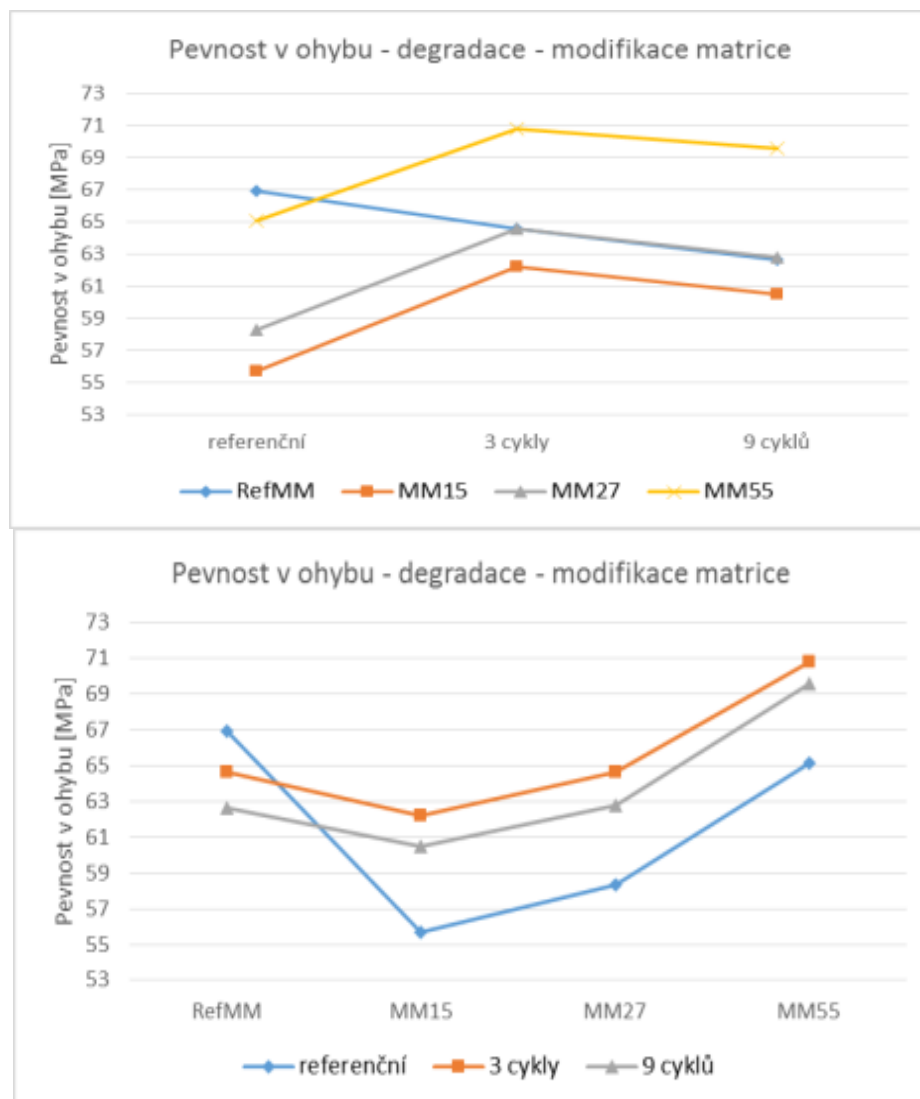
Graf 45 Poměrné prodloužení vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:
 RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Vyhodnocení poměrného prodloužení poukázalo na nárůst hodnot u všech zkušebních těles po 9 cyklech expozice kromě těch s 15% podílem recyklátu. U vzorků z primárního polymeru se projevilo mírné pokles po třech cyklech expozice a poté nárůst převyšující hodnotu v postprodukčním stavu o 8,7 %. Obdobný průběh byl zaznamenán také u zkušebních těles s 50% náhradou recyklátu v matrici. Vzorky s 15% podílem recyklátu, zřejmě vlivem dosíťování matrice dosáhly po devíti cyklech poklesu poměrného prodloužení o 19 %.

Vyhodnocení pevnosti v ohybu uvádí následující Tabulka 13 a Graf 46.

Tabulka 13 Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem.

Označení vzorku	Pevnost v ohybu – cyklická degradace		
	[MPa]		
	referenční	3 cykly	9 cyklů
RefMM	66,91±0,615	64,6±0,215	62,6±0,846
MM15	55,7±2,090	62,2±1,030	60,5±0,789
MM27	58,3±0,803	64,6±0,907	62,8±1,590
MM55	65,1±0,700	70,8±0,653	69,6±0,515

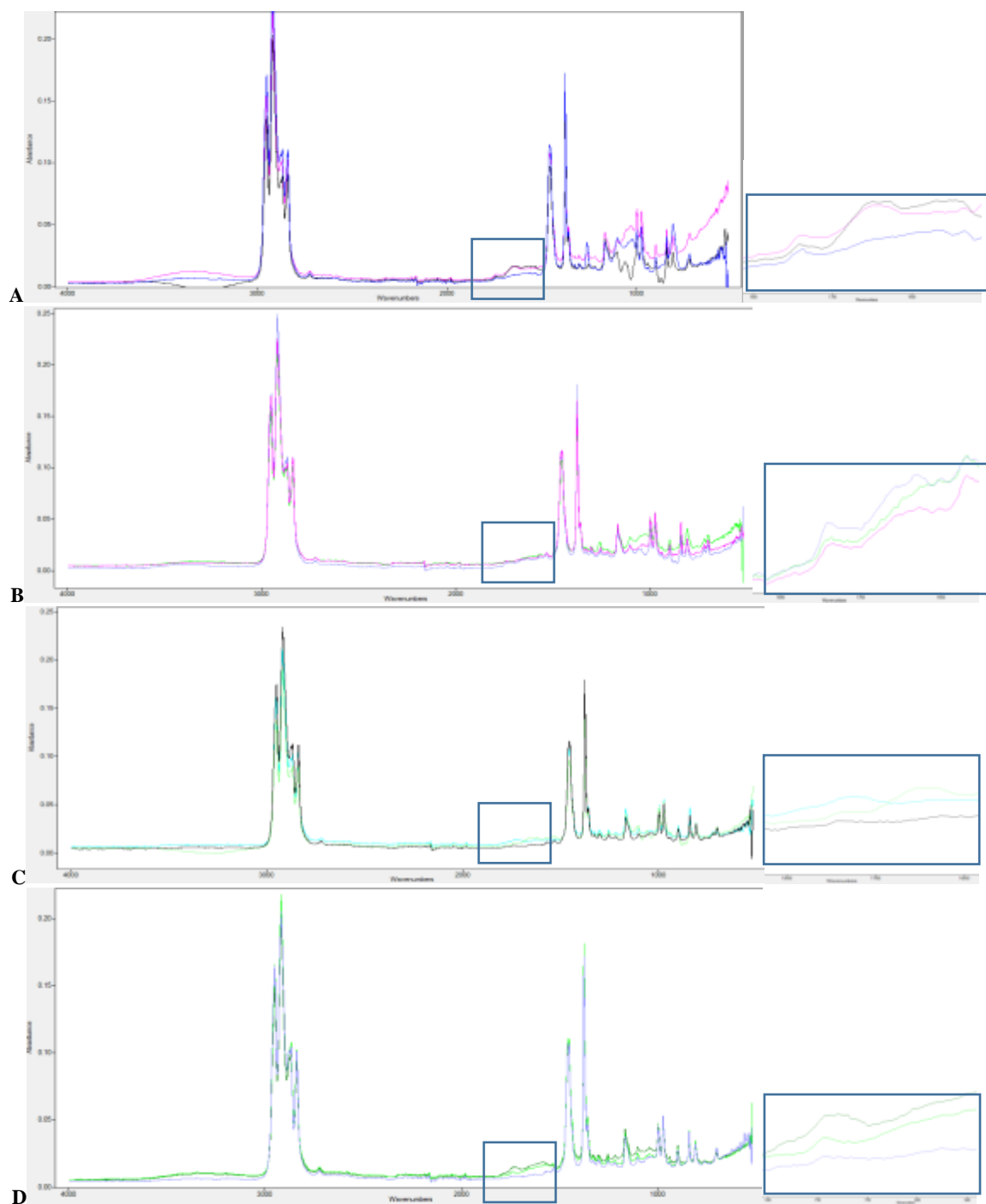


Graf 46 Pevnost v ohybu vzorků s náhradou primárního polymeru nebo podílem recyklátu v matrici v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:
 RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Pevnost v ohybu vykazovala obdobný trend u všech zkušebních těles s podílem regranulátu v matrici. Z původní hodnoty referenčních vzorků v postprodukčním stavu došlo k nárůstu hodnoty ohybové pevnosti po třech cyklech expozice nepříznivým podmínkám a poté k mírnému poklesu. Tento trend odpovídá výsledkům tahových charakteristik. V průběhu expozice se předpokládá dosíťování homopolymeru, čímž se zlepšila jeho odolnost a projevila

se zvýšenou hodnotou ohybové pevnosti. Navazující zatěžování nepříznivými podmínkami pak způsobilo zahájení degradační fáze, která se dále projevila mírným poklesem. Zkušební tělesa s matricí z primárního polymeru vykazala lineární pokles hodnot, což svědčí o postupné degradaci vzorků.

Vliv degradace cyklickou expozicí byl sledován také prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie (posouzení změn v chemické struktuře povrchových vrstev). Spektrogramy zkušebních těles uvádí následující Spektrogram 6. Studium spektrogramů se zaměřovalo na odhalení změn v oblasti $1600-1800\text{ cm}^{-1}$, kde se nachází spektrální pásy produktů Norishových reakcí, tedy karbonylových radikálů a koncových vinylových skupin. Jak lze pozorovat na spektrogramech degradovaných zkušebních těles, u všech vzorků postupně dochází k rozvoji těchto funkčních skupin. Infračervená absorpční spektroskopie tedy potvrdila počínající degradaci zkušebních těles vlivem působení fotooxidace.



Spektrogram 6 Srovnání spektrogramů referenčních (v postprodukčním stavu) a degradovaných (3 a 9 cyklů):

A = RefMM – pouze s primárním polypropylenem: referenční (modrý), po 3 cyklech (růžový), po 9 cyklech (černý)

B = MM15 – s 15% regranulátu: referenční (zelený), po 3 cyklech (růžový), po 9 cyklech (modrý)

C = MM27 – s 27,5% regranulátu: referenční (černý), po 3 cyklech (tyrkysový), po 9 cyklech (bledě zelený)

D = MM55 – s matricí z regranulátu: referenční (modrý), po 3 cyklech (tmavě zelený), po 9 cyklech (bledě zelený)

Zatížení expozicí UV záření

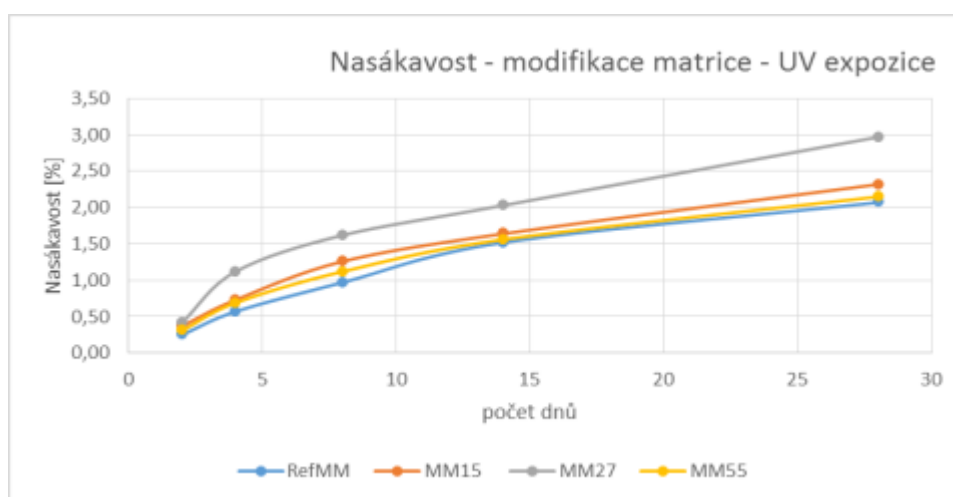
Druhý typ degradujícího prostředí byl vyvozen expozicí UV záření v ozařovací komoře. Zkušební tělesa byla ozařována kontinuálně, hodnoty sledovaných charakteristik byly

stanoveny po 1000 hodinách ozařování. Hodnoceny byly fyzikální a mechanické charakteristiky a také změna chemické struktury.

Nasákavost po zkušebních těles byla stanovena po 2, 4, 8, 14 a 28 dnech ponoření do destilované vody. Vyhodnocení nasákavosti uvádí Tabulka 14 a Graf 47.

Tabulka 14 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem vystavených cyklické expozici vlhkosti, mrazu a vysoušení.

Nasákavost (počet dnů)	RefMM	MM15	MM27	MM55
	[%]	[%]	[%]	[%]
UV expozice				
2	0,25	0,37	0,42	0,31
4	0,57	0,73	1,12	0,69
8	0,97	1,26	1,62	1,12
14	1,52	1,64	2,03	1,56
28	2,07	2,32	2,97	2,15



Graf 47 Nasákavost zkušebních těles s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:

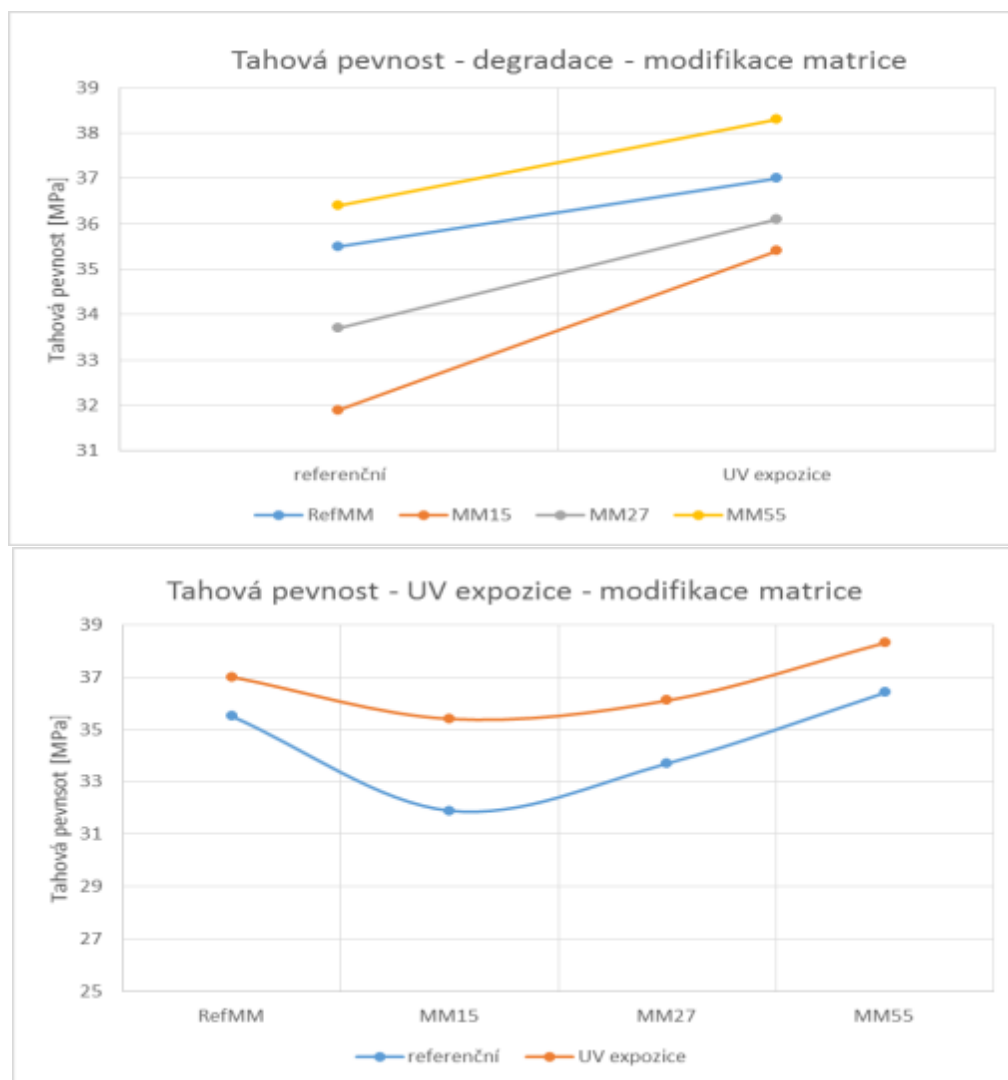
RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Nasákavost zkušebních těles po vystavení 1000 hodinám osvitů v UV komoře se vyznačovala obdobným průběhem jako nasákavost těles v postprodukčním stavu a vystavených cyklické degradaci v nepříznivých podmínkách. Zkušební tělesa vykázala postupný nárůst hodnoty nasákavosti v průběhu 28 denního intervalu ponoření. Konečná nasákavost všech zkušebních těles byla po vyjmutí z vodní lázně nižší než u zkušebních těles v postprodukčním stavu. Tato skutečnost je připisována dosíťování polypropylénové matric indukovanému působením UV záření. Nejvyšších hodnot nasákavosti bylo dosaženo u zkušebních těles se směsnou matricí s polovičním podílem recyklátu.

Vyhodnocení tahových charakteristik uvádí následující Tabulka 15 a grafy (Graf 47, Graf 48 a Graf 49).

Tabulka 15 Vyhodnocení tahových charakteristik zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem vystavených UV degradaci.

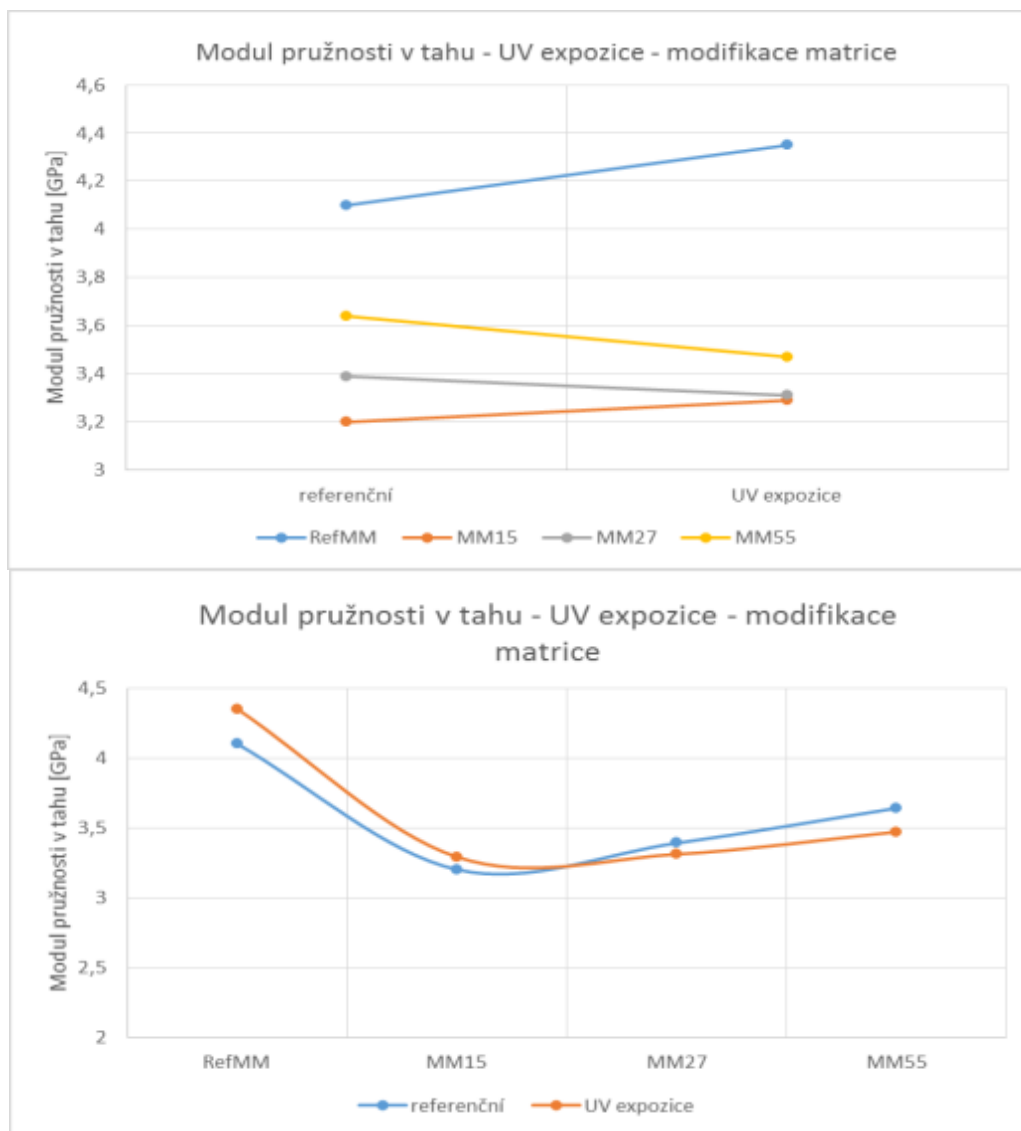
Označení vzorku	referenční			UV expozice		
	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení
	[MPa]	[GPa]	[-]	[MPa]	[GPa]	[-]
RefMM	35,5±0,813	4,10±0,096	0,023	37,0±0,435	4,35±0,032	0,015
MM15	31,9±0,872	3,20±0,102	0,042	35,4±0,806	3,29±0,085	0,041
MM27	33,7±0,920	3,39±0,047	0,029	36,1±0,405	3,31±0,036	0,026
MM55	36,4±0,671	3,64±0,135	0,013	38,3±0,388	3,47±0,129	0,020

**Graf 48** Tahová pevnost zkušebních těles s matricí z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:

RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Tahová pevnost stanovené u zkušebních těles vystavených expozici UV záření zaznamenala nárůst u všech vzorků. Tento jev je důsledkem dosíťování matrice vlivem působení UV záření. Nejvyšších hodnot tahové pevnosti dosáhla zkušební tělesa, jejichž matrice byla připravená pouze z recyklátu. Tato skutečnost je v souladu s charakterem polymeru, jehož deklarovaná pevnost v neplněném stavu by měla dosáhnout 35 MPa. Nárůst

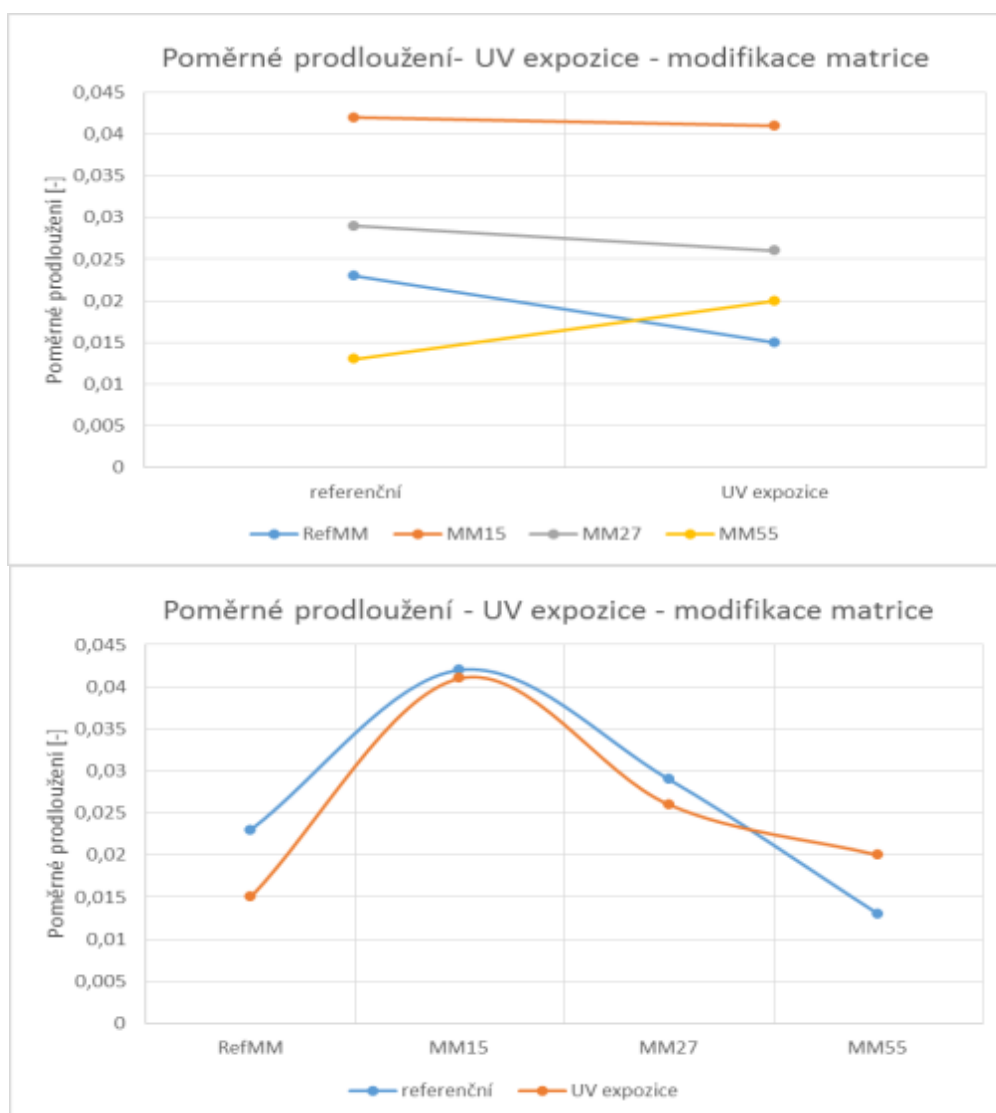
tahové pevnosti vlivem UV expozice se projevuje do určitého bodu expozice, kdy UV záření působí současně jako faktor indukující další síťování a způsobující štěpení makromolekulových řetězců na osvitové ploše. Po dosažení maximální krystalinity lze předpokládat rychlý pokles pevnostních charakteristik.



Graf 49 Modul pružnosti v tahu zkušebních těles s matricí z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:

RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Kromě zkušebních těles z primárního polymeru mělo UV záření na modul pružnosti zkušebních těles redukující vliv. Se zvyšujícím se podílem recyklátu v matrici došlo postupně k úbytku hodnoty modulu pružnosti, který se nejvýrazněji projevil u vzorků s matricí tvořenou pouze recyklátem (o 4,7 %). Vzhledem k výsledkům poměrného prodloužení lze usuzovat na počínající degradaci recyklátového polymeru – nárůst tahové pevnosti byl pouze mírný a poměrné prodloužení dosáhlo zvýšení o přibližně 50 %.



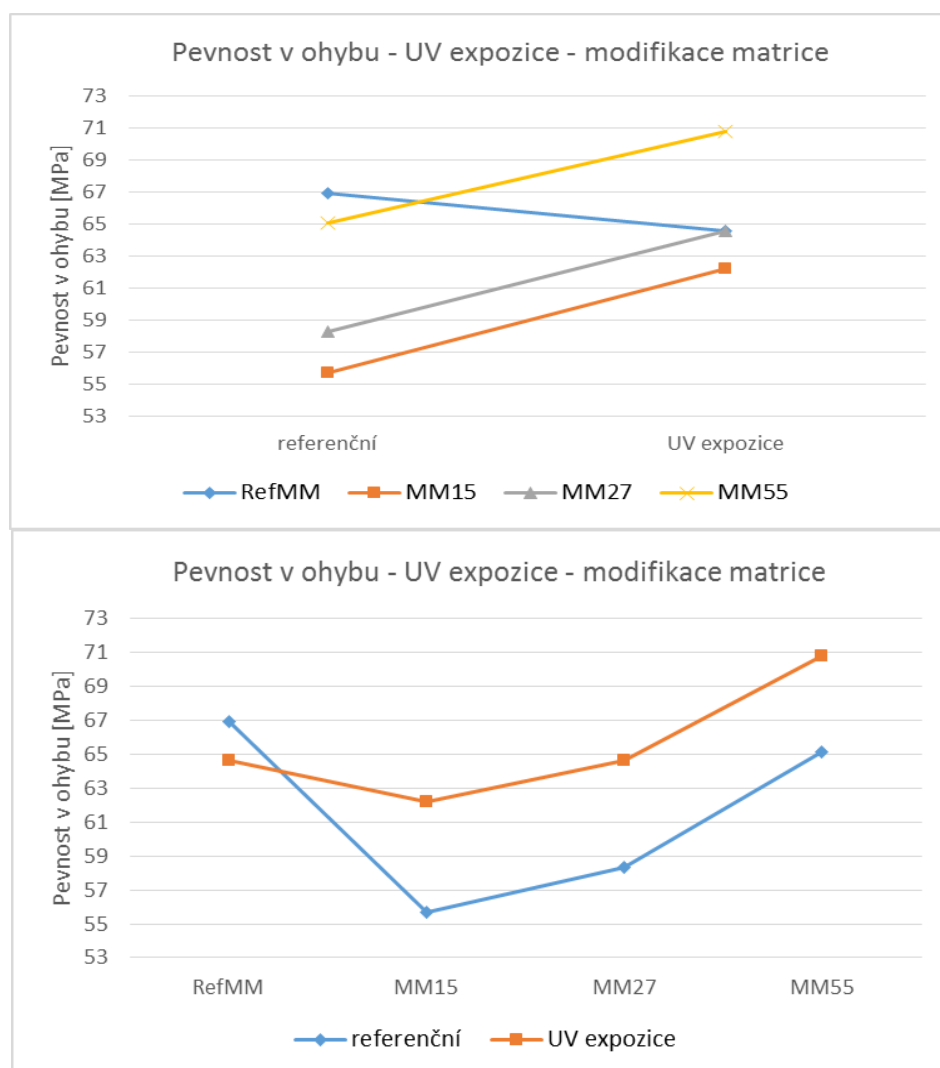
Graf 50 Tahová pevnost zkušebních těles s matricí z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:

RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles vystavených UV degradaci uvádí následující Tabulka 16 a Graf 51.

Tabulka 16 Vyhodnocení ohybové pevnosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem vystavených UV degradaci.

Označení vzorku	Pevnost v ohybu [MPa]	
	referenční	UV expozice
RefMM	66,9±0,615	61,3±0,780
MM15	55,7±2,090	65,0±1,076
MM27	58,3±0,803	68,4±0,069
MM55	65,1±0,700	74,68±0,339

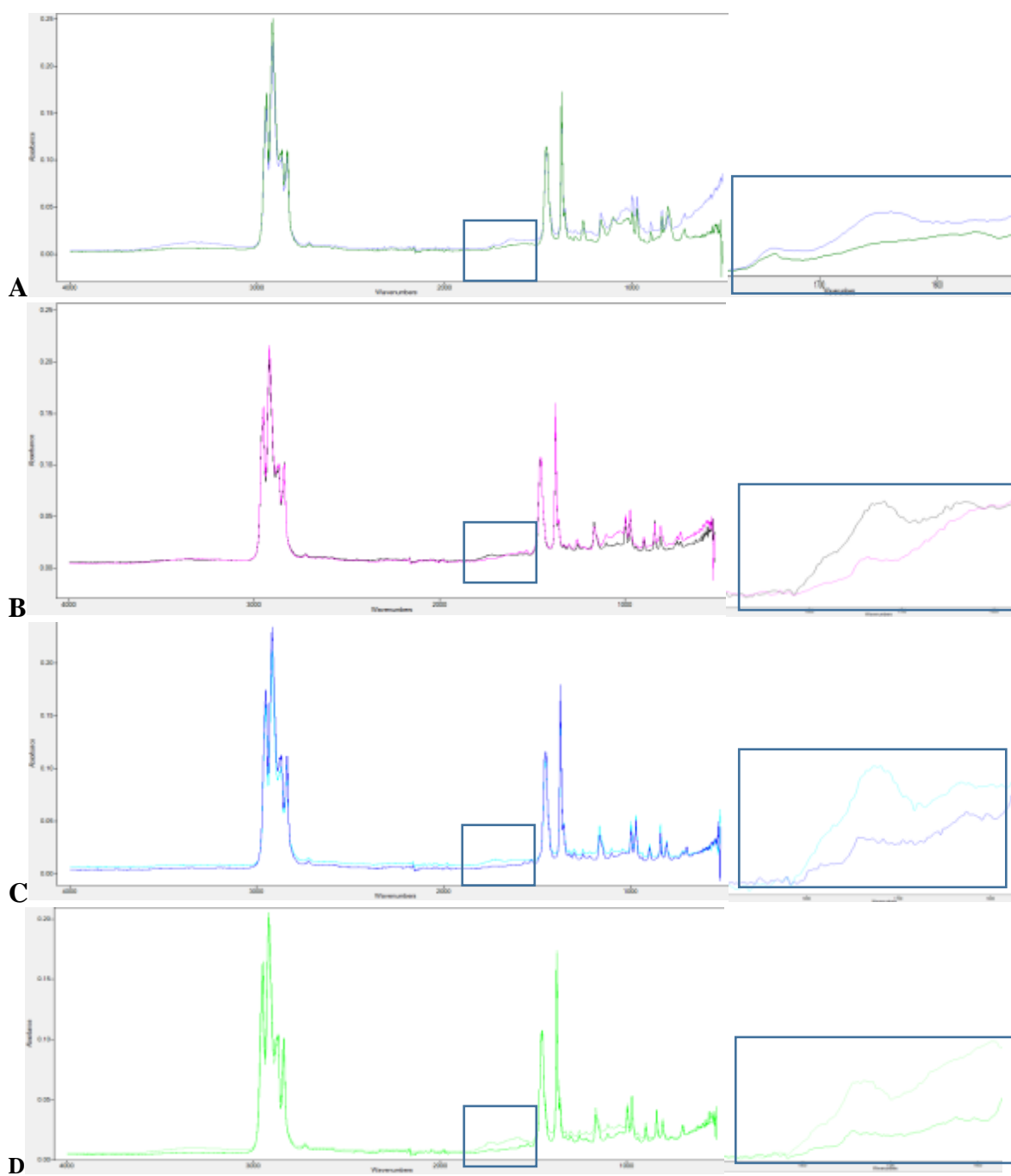


Graf 51 Ohybová pevnost zkušebních těles s matricí z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:

RefMM – pouze s primárním polypropylenem, MM15 – s 15% podílem regranulátu, MM27 – s 27,5% podílem regranulátu, MM55 – s matricí z regranulátu

Ohybová pevnost zkušebních těles vystavených UV expozici měla, obdobně jako tahové charakteristiky, narůstající trend u zkušebních těles obsahujících podíl recyklátu v matrici, což lze připsat dosíťování polymeru. Pouze u zkušebních těles vyrobených z primárního polymeru došlo k mírnému poklesu hodnoty ohybové pevnosti (o 8 %).

Sekundární zkoušení těles vystavených degradačním vlivům UV záření bylo realizováno posouzením chemické struktury prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie. Vyhodnocení chemické struktury prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie uvádí následující Spektrogram 7. U vzorků byla rovněž sledována oblast spektrálních pásů na vlnočtu $1680-1800\text{ cm}^{-1}$, kde se vyskytují vibrace produktů Norishových reakcí, tedy karbonylových a vinylových skupin. U všech zkušebních těles se tyto pásy po expozici UV záření vyskytovaly.



Spektrogram 7 Srovnání spektrogramů referenčních (v postprodukčním stavu) a vystavených UV záření (UV expoziční):

- A = RefMM – pouze s primárním polypropylenem: referenční (zelený), UV expoziční (modrý)
- B = MM15 – s 15% podílem regranulátu: referenční (zelený), UV expoziční (růžový)
- C = MM27 – s 27,5% podílem regranulátu: referenční (modrý), UV expoziční (tyrkysový)
- D = MM55 – s matricí z regranulátu: referenční (tmavě zelený), UV expoziční (bledě zelený)

4.3 Etapa III – Modifikace plniva

Modifikace plniva byla realizována příměsí sférického plniva jako náhrady vláknové dřevní moučky. Výsledky třetí etapy jsou uvedeny v textu níže.

4.3.1 Laboratorní zkoušení zkušebních těles v postprodukčním stavu

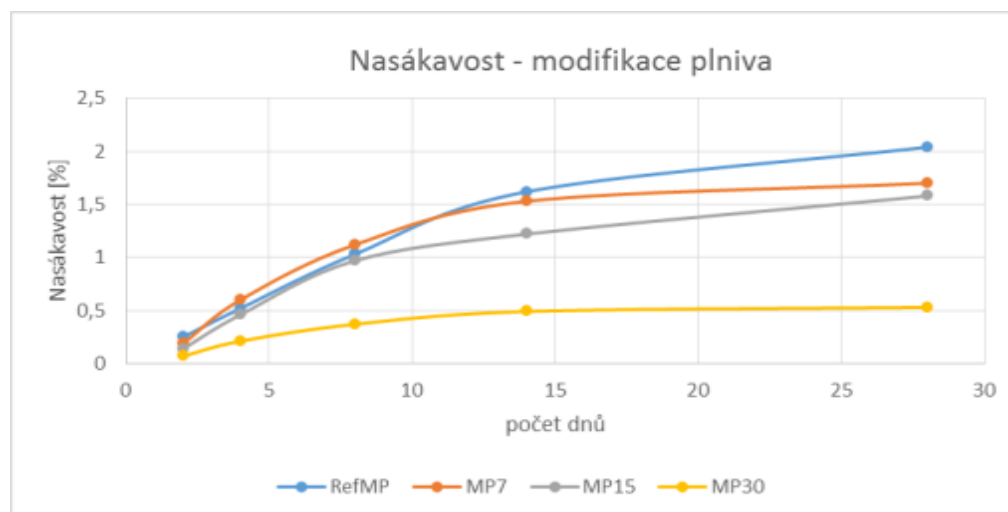
V první fázi třetí etapy byly provedeny základní (výchozí) zkoušky vlastností dřevoplastového kompozitu modifikovaného příměsí popílku z elektrárny Rybnik (Polsko) v podílu 7,5; 15 a 30 % z celkového objemu surovinové směsi.

Stanovení nasákavosti

Nasákavost zkušebních těles byla stanovena ponořením do destilované vody. Hodnoty byly odečítány v intervalu po 2, 4, 8, 14 a 28 dnech. Vyhodnocení nasákavosti uvádí následující Tabulka 17 a Graf 52.

Tabulka 17 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem.

Nasákavost (počet dnů)	RefMP	MP7	MP15	MP30
	[%]			
2	0,25	0,19	0,14	0,07
4	0,52	0,6	0,46	0,21
8	1,03	1,12	0,97	0,37
14	1,62	1,53	1,22	0,49
28	2,04	1,70	1,58	0,53



Graf 52 Nasákavost vzorků s příměsí nebo náhradou plniva popílkem:

RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

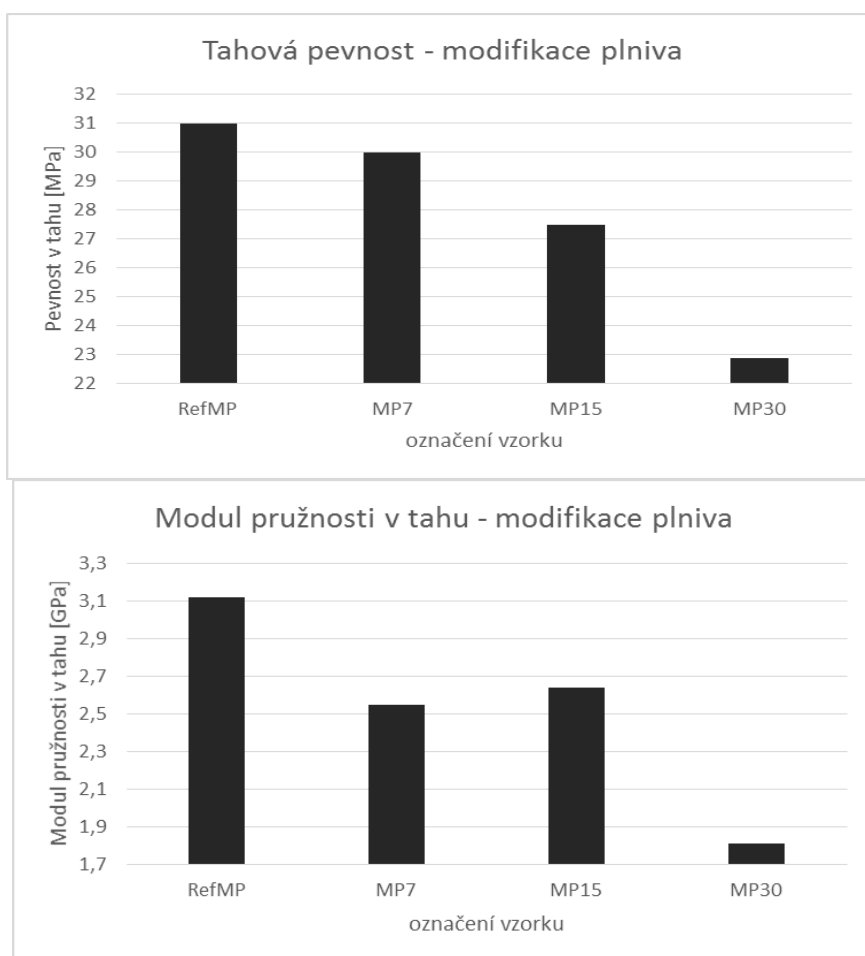
Nejvyšších hodnot nasákavosti bylo dosaženo u zkušebních těles obsahujících pouze dřevní moučku, která se obecně vyznačuje vyšší nasákavostí. Z průběhu nasákavosti lze usuzovat na kompaktnější strukturu kompozitu, u nějž byly drobné póry vyplněny nejmenší frakcí popílku. Tuto skutečnost podporuje průběh nasákavosti zkušebních těles plněných pouze popílkem, u kterého dosáhla nasákavost po 28 dnech čtvrtinové hodnoty v porovnání s nasákavostí kompozitu plněného pouze dřevní moučkou a téměř třetinové hodnoty (31,2 %) v porovnání se zkušebními tělesy s 15% plněním dřevní moučkou.

Fyzikálně mechanické vlastnosti – tahové charakteristiky

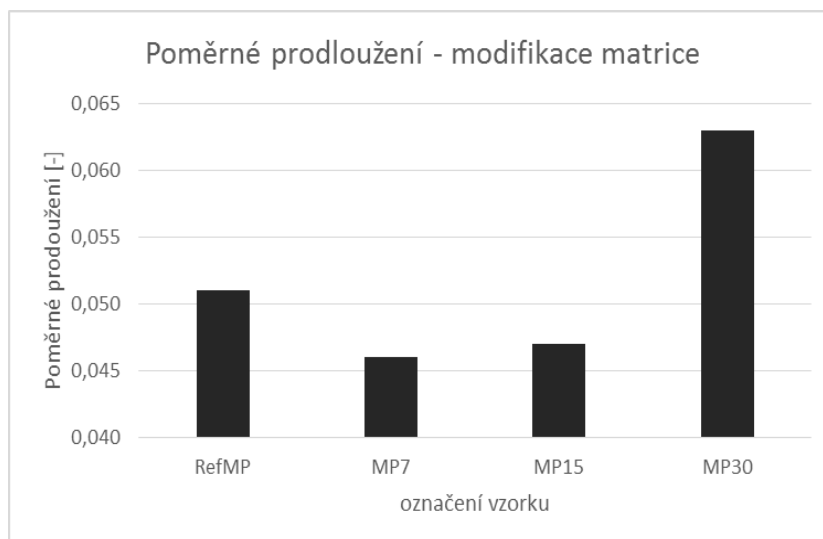
Vyhodnocení tahových charakteristik dřevoplastového kompozitu s náhradou vláknového dřevitého plniva anorganickou příměsí se sférickým charakterem je uvedeno v následující tabulce (Tabulka 18) a grafech (Graf 54 a Graf 54).

Tabulka 18 Vyhodnocení pevnosti v tahu, modulu pružnosti a poměrného prodloužení zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem.

Označení vzorku	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení
	[MPa]	[GPa]	[-]
RefMP	31,0±0,292	3,12±0,0350	0,051
MP7	30,0±0,311	2,55±0,414	0,046
MP15	27,5±1,646	2,64±0,268	0,047
MP30	22,9±0,636	1,81±0,203	0,063



Graf 53 Pevnost v tahu a modul pružnosti vzorků s příměsí nebo náhradou plniva popílkem: RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).



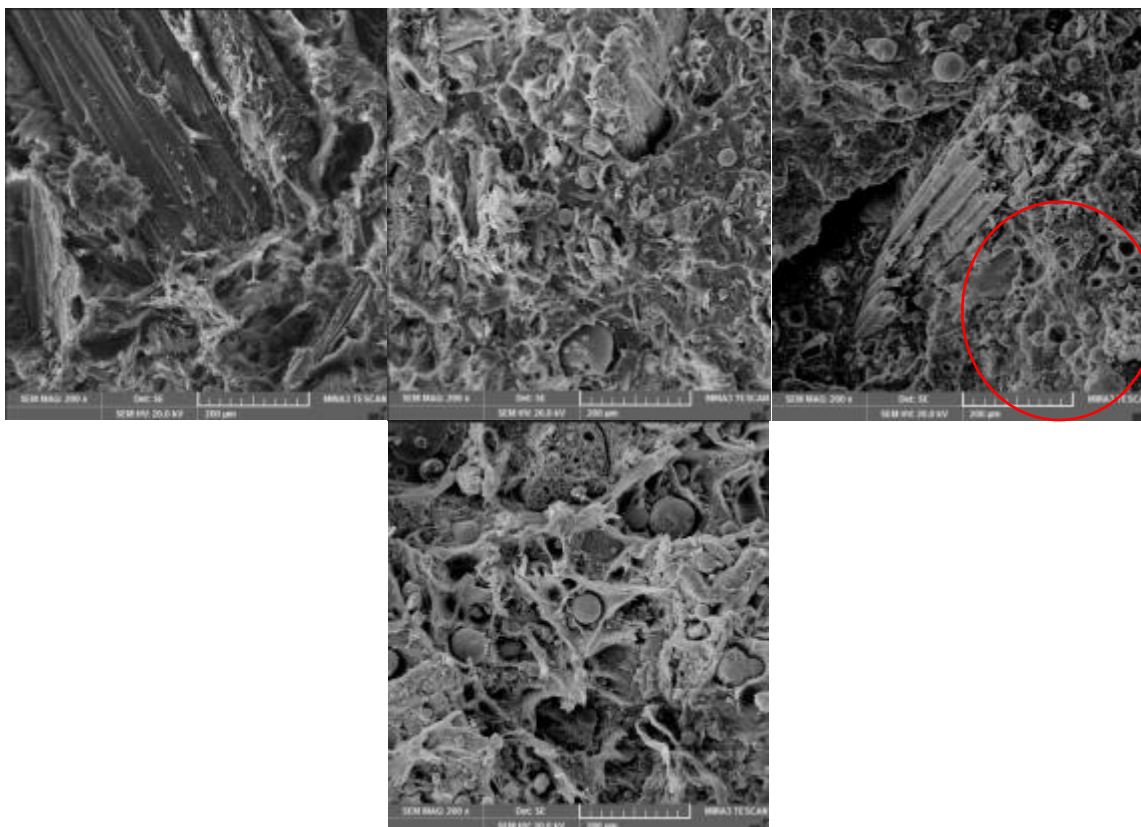
Graf 54 Poměrné prodloužení vzorků s příměsí nebo náhradou plniva popílkem:

RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

Jak lze odvodit z uvedených výstupů měření, tahové charakteristiky byly anorganickou příměsí výrazně ovlivněny. Vlivem dostatečného přídavku kompatibilizéru, který u této směsi obsahující pouze 30 % plniva činil 3 %, došlo k optimálnímu obalení zrn plniva, interakce obou hlavních složek kompozitu se v případě referenčních těles obsahujících pouze dřevní hmotu projevila zvýšením hodnoty tahové pevnosti vůči deklarovaným 25 MPa neplněného polymeru. Na výsledcích tahové pevnosti je dobře patrný vliv vláknového plniva přenášející veškeré zatížení tahem. Podíl anorganického plniva sférického charakteru pak zapříčinil postupný pokles hodnot pevnosti i modulu pružnosti v tahu (s výjimkou těles s příměsí 15 %, u nichž byl zaznamenán mírný nárůst mezi hodnotami). Celkový pokles tahové pevnosti v závislosti na obsahu příměsí činil 26 %, celkový pokles modulu pružnosti 42 %.

Poměrné prodloužení mělo v porovnání s tahovou pevností a modulem pružnosti odlišnou tendenci. Z jeho hodnot lze usuzovat na přenos zatížení také sférickým plnivem, jehož interakce s vláknitým plnivem zapříčinila porušení zkušební tělesa při o 10 % nižším poměrném prodloužení. Nepřítomnost vláknového plniva (MP30) pak způsobila porušení zkušební tělesa v matrici, která však nedosáhla ani deklarované tahové pevnosti vlivem heterogenní struktury dané plněním.

Pro posouzení vlivu podílu a typu směsi plniva byla dále studován morfologie materiálu na lomové ploše prostřednictvím elektronového rastrovacího mikroskopu. Pořízené snímky uvádí následující Obrázek 23.



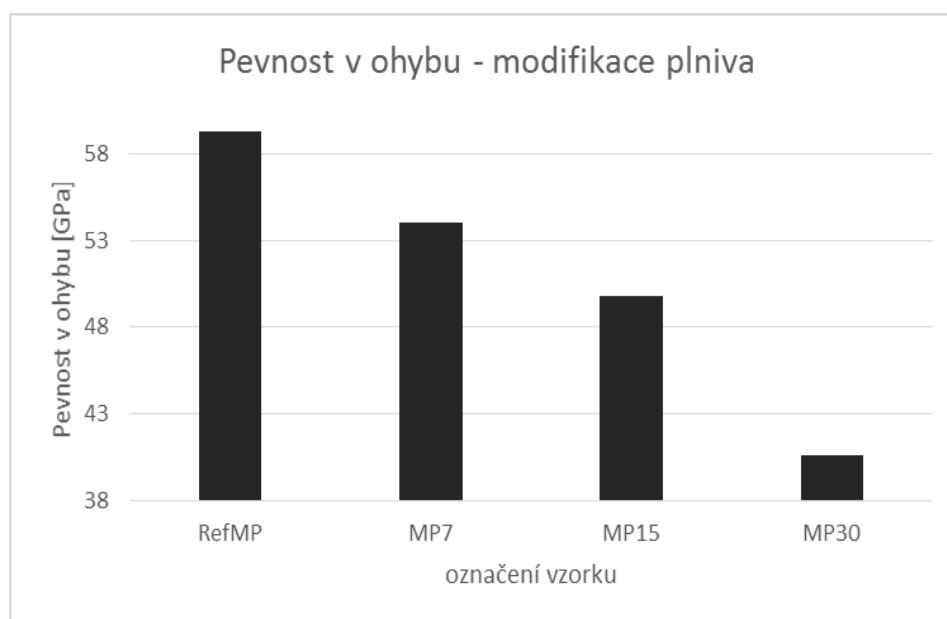
Obrázek 23 SEM snímky lomové plochy zkušebních těles při 200× zvětšení: RefMP (nahore vlevo), MP7 (nahore uprostřed), MP15 (nahore vpravo) a MP30 (dole).

Získané snímky poukazují na lomové chování vzorků kompozitu. Snímek lomové plochy zkušebního tělesa obsahujícího pouze vláknové plnivo zobrazuje porušení právě v částici plniva, která přenesla většinu tahového zatížení. Obdobně u zkušebního tělesa obsahujícího 15 % příměsi (MP15) došlo v místě, kde kritické zatížení působilo na vlákna plniva, k porušení v dřevní moučce. Ze snímků je také patrné, že k porušení na úrovni částicového plniva vlivem působení zatížení nedochází. Při lomu je plnivo vytrženo, což se v lomové ploše projeví vznikem jamek (označeno červenou kružnicí). Na snímcích je také vidět, v jaké míře dochází k porušení polymerní matrice, což doprovází vznik *vějířků*, které lze pozorovat především na lomové ploše zkušebního tělesa obsahujícího pouze sférické plnivo.

Vedle tahových charakteristik bylo provedeno také stanovení pevnosti v ohybu zkušebních těles. Jeho výstupy uvádí následující Tabulka 19 a Graf 55.

Tabulka 19 Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles s příměsí nebo náhradou plniva popílkem.

Označení vzorku	Modul pružnosti
	[GPa]
RefMP	59,3±2,630
MP7	54,0±0,765
MP15	49,8±1,546
MP30	40,6±3,219



Graf 55 Pevnost v ohybu vzorků s příměsí nebo náhradou plniva popílkem:

RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

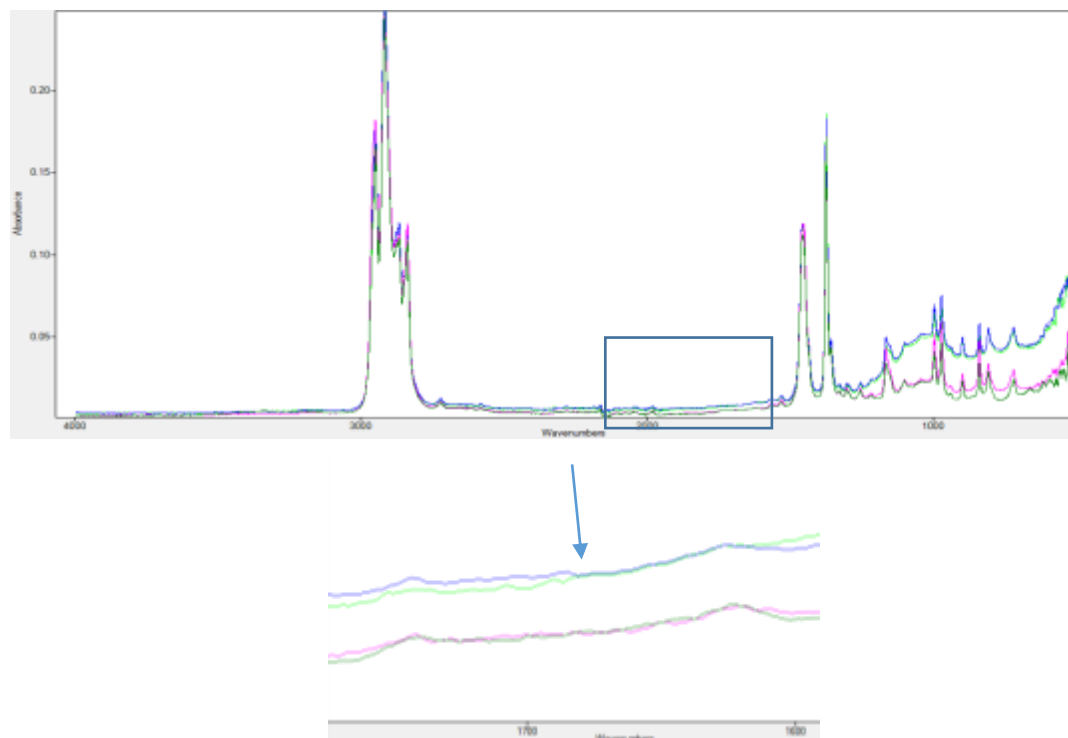
Obdobně jako tahové charakteristiky, i pevnost v ohybu byla výrazně ovlivněna přítomností sférického plniva ve struktuře kompozitu. V návaznosti na jeho podíl se ohybová pevnost postupně snížila, zkušební tělesa obsahující pouze popílek vykazala o 31,5 % nižší ohybovou pevnost v porovnání se vzorky bez příměsí. Tato skutečnost je dána opět interakcí mezi maticí a plnivem a neschopností sférických částic přenášet zatížení ohybem.

U zkušebních těles byly v základním postprodukčním stavu naměřeny také spektrogramy pro další posuzování chemické struktury dřevoplastového kompozitu modifikovaného anorganickou sférickou příměsí. Vyhodnocení spektrogramů uvádí následující Tabulka 20 a Spektrogram 8. U zkušebních těles v postprodukčním stavu se neprojevovalo žádné štěpení řetězců.

Tabulka 20 Spektrální pásy dřevoplastového kompozitu s polypropylenovou maticí, spektrální pásy popílku

Vlnočet [cm^{-1}]	Vazba, vibrace
Polypropylen	
2952, 2918, 2838	C-H valenční vibrace
2720	CH deformační a CH ₃ valenční vibrace
1456	CH ₃ asymetrická valenční vibrace
1376	CH ₃ symetrická valenční vibrace
1165	deformační vibrace terciárního uhlíku
974, 841, 808	C-H deformační vibrace
Dřevní hmota	
3400	O-H valenční vibrace
3000-2800	C-H valenční vibrace v metylových skupinách
1728	C=O valenční vibrace v karboxylových kyselinách
1650	volné O-H a konjugované C-O vazby
1606, 1511-1505	C=C valenční vibrace aromatického uhlovodíku ligninu
1462	CH ₂ deformační vibrace v ligninu a karbohydrátech

1375	C-H deformační vibrace v celulóze a hemicelulózách
1268	C-O valenční vibrace v ligninu
1163	C-O-C asymetrická valenční vibrace v celulóze
1059	C-O valenční vibrace v celulóze a hemicelulózách
897	C-H deformační vibrace v celulóze
Popílek	
1320, 980	Si-O tetraedr deformační vibrace, Al-O
484	Fe-O deformační vibrace



Spektrogram 8 Naměřené spektrum zkušebních těles s podílem regenerátu v matrici (nahore), označení oblasti výskytu produktů Norrishových reakcí (dole):

RefMP – pouze s dřevní moučkou (tmavě zelený), MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku (modrý), MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku (růžový), MP30 – pouze s popílkem (30 %, bledě zelený).

4.3.2 Zrychlené stárnutí a zkoušení degradovaných těles

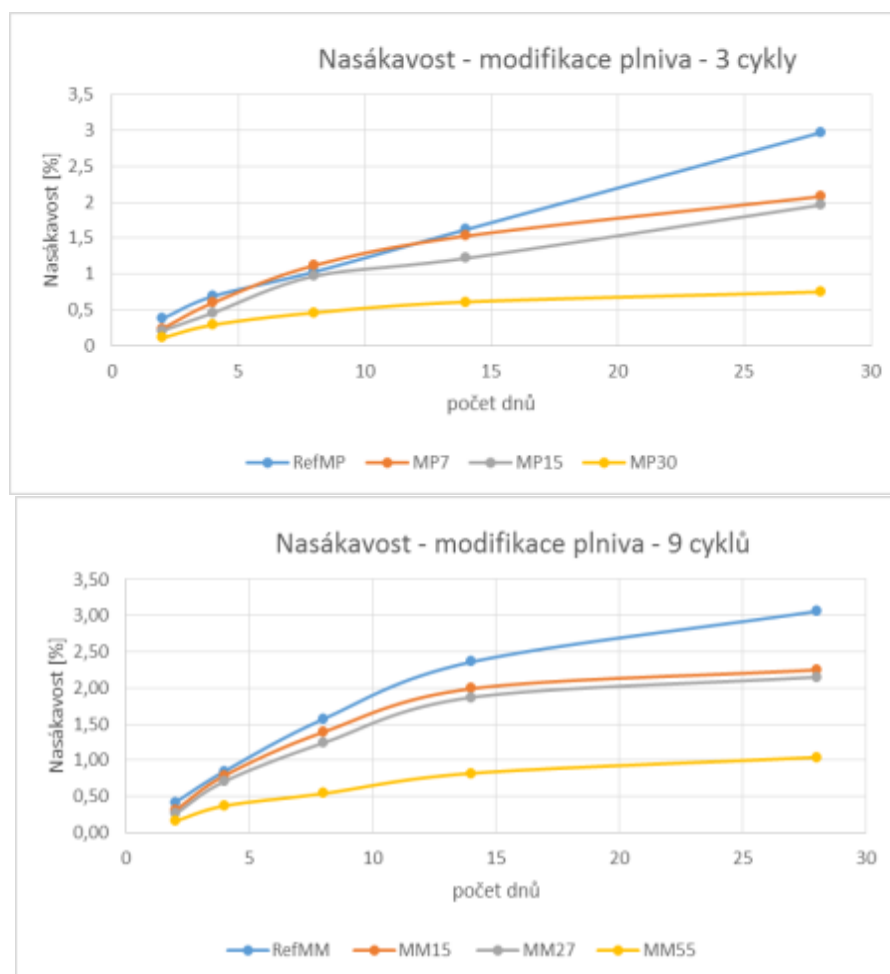
Zrychlené stárnutí, stejně jako u zkušebních těles modifikovaných recyklátem v matrici, bylo realizováno dvěma postupy – prostřednictvím cyklického zatěžování vlhkostí, mrazem a vysoušením (zvýšenou teplotou) po 3 a 9 cyklech a vystavením 1000 hodinám osvětlení v UV komoře. Vyhodnocení sledovaných charakteristik je uvedeno v textu níže.

Cyklické zatěžování vlhkostí, mrazem a vysoušením

První charakteristikou sledovanou u degradovaných zkušebních těles byla nasákavost po 28 dnech. U degradovaných těles byla po skončení třetího a devátého cyklu stanovena nasákavost 2, 4, 8, 14 a 28 dnech. Výstupy zkoušek uvádí Tabulka 11 a Graf 42.

Tabulka 21 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s příměsí popílku vystavených cyklické expozici vlhkosti, mrazu a vysoušení.

Nasákavost (počet dnů)	RefMP	MP7	MP15	MP30
	[%]			
3 cykly				
2	0,38	0,24	0,21	0,11
4	0,69	0,60	0,46	0,29
8	1,03	1,12	0,97	0,46
14	1,62	1,53	1,22	0,61
28	2,97	2,08	1,96	0,75
9 cyklů				
2	0,42	0,31	0,26	0,16
4	0,85	0,79	0,71	0,37
8	1,57	1,39	1,24	0,54
14	2,36	1,99	1,87	0,82
28	3,06	2,25	2,15	1,04

**Graf 56** Nasákavost zkušebních těles s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice:

RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

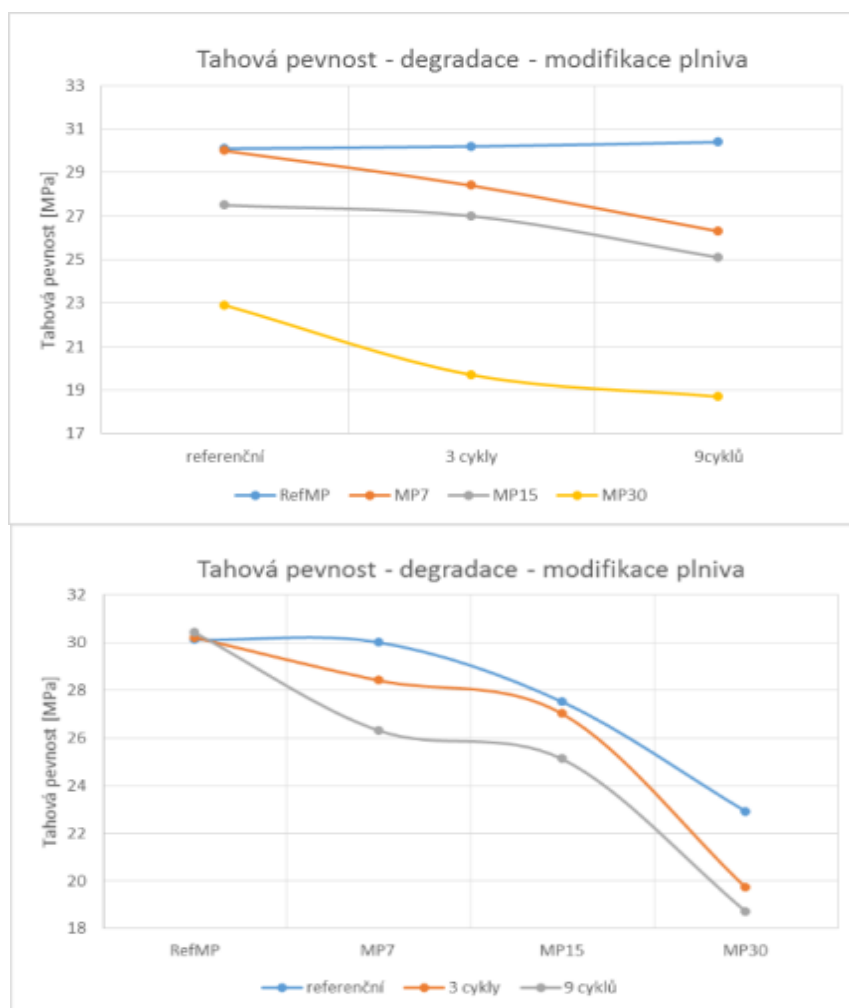
Nasákavost zkušebních těles po vystavení nepříznivým podmínkám cyklického ponoření do vody, mrazu a vysoušení vykázala stejný trend jako u zkušebních těles v postprodukčním stavu. Nejnižších hodnot nasákavosti dosáhla zkušební tělesa obsahující pouze popílek. Rozdíl mezi hodnotami po vystavení 3 a 9 cyklům byl velmi mírný, zejména u zkušebních těles bez příměsí popílku. U zkušebních těles obsahujících příměs se zvýšil v závislosti na

jejím podílu o 7,5; 8,8 resp. 28 %. Tuto skutečnost lze přisuzovat počínající degradaci zkušebních těles.

Tahové charakteristiky degradovaných zkušebních těles byly posuzovány s ohledem na hodnoty stanovené u referenční sady vzorků zkoušených v postprodukčním stavu. Vyhodnocení zkoušek tahových charakteristik uvádí následující Tabulka 22 a ilustrují grafy (viz Graf 57).

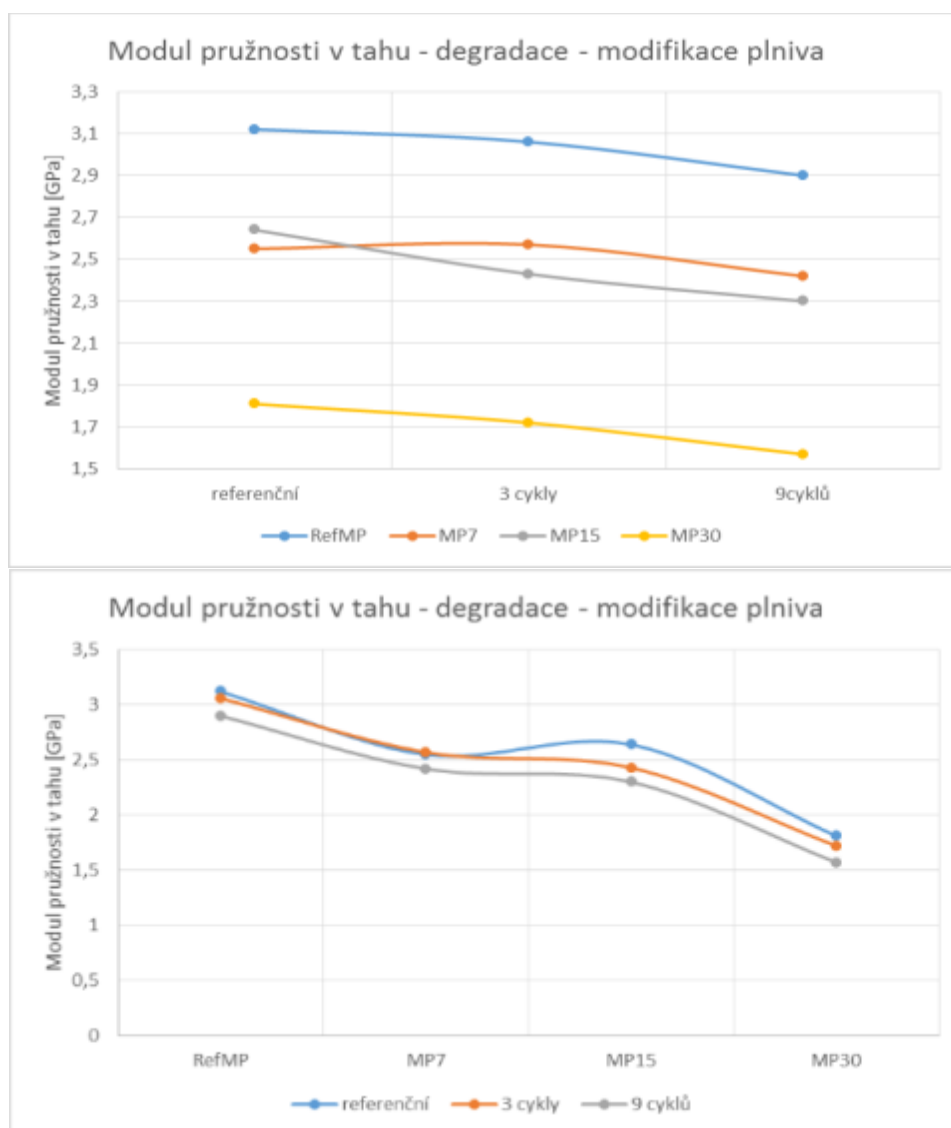
Tabulka 22 Tahové charakteristiky vzorků s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám.

Označení vzorku	referenční			3 cykly			9 cyklů		
	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení
	[MPa]	[GPa]	[-]	[MPa]	[GPa]	[-]	[MPa]	[GPa]	[-]
RefMP	31,0±0,292	3,12±0,0350	0,051	30,2±0,317	3,06±0,201	0,046	30,4±0,209	2,90±0,092	0,049
MP7	30,0±0,311	2,55±0,414	0,046	28,4±0,622	2,57±0,049	0,058	26,3±0,817	2,42±0,109	0,063
MP15	27,5±1,646	2,64±0,268	0,047	27,0±0,708	2,43±0,093	0,076	25,1±1,004	2,30±0,214	0,087
MP30	22,9±0,636	1,81±0,203	0,063	19,7±0,018	1,72±0,036	0,079	18,7±0,632	1,57±0,092	0,095



Graf 57 Tahová pevnost vzorků s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:
 RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

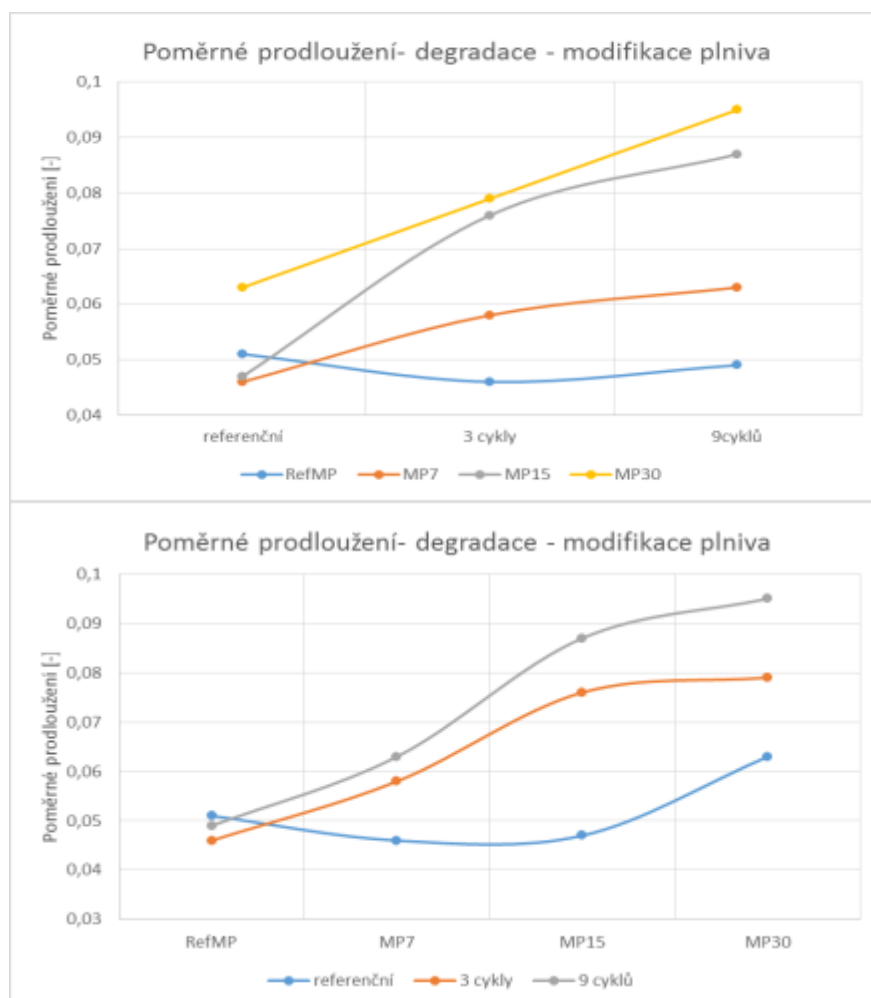
Příměs popílku ovlivnila tahové charakteristiky zkušebních těles v degradovaném stavu obdobně jako v postprodukční fázi. Přídavek příměsi způsobil pokles pevností u všech typů zkušebních těles s výjimkou kompozitu obsahujícího pouze vláknovou výztuž, který vykázal stabilní hodnoty po celou dobu expozice. U zkušebních těles plněných pouze popílkiem dosáhl celkový pokles pevnosti až 18,4 %, v porovnání se zkušebními tělesy plněnými pouze dřevní moučkou dosáhla tato tělesa pouze 61,5 % pevnosti. Pokles vlivem přídavku příměsi se projevil také u zkušebních těles se směsným plnivem, a to o 12,3 % u vzorků se čtvrtinovou příměsí a o 8,8 % u vzorků s poloviční příměsí. V porovnání s kompozitem bez příměsi byl tento pokles 13,5 % resp. 17,5 %.



Graf 58 Modul pružnosti v tahu vzorků s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:

RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkiem (30 %).

Počáteční pevnosti degradovaných zkušebních těles, které jsou charakterizovány modulem pružnosti v tahu, měly u všech typů zkušebních těles obdobný trend vývoje. Vlivem působení nepříznivých podmínek došlo pouze k mírnému poklesu modulu pružnosti, který se průměrně pohyboval mezi 5 a 13 %. U zkušebních těles s 15% podílem popílku byl po třech cyklech zatěžování degradačními faktory zaznamenán mírný nárůst hodnoty.



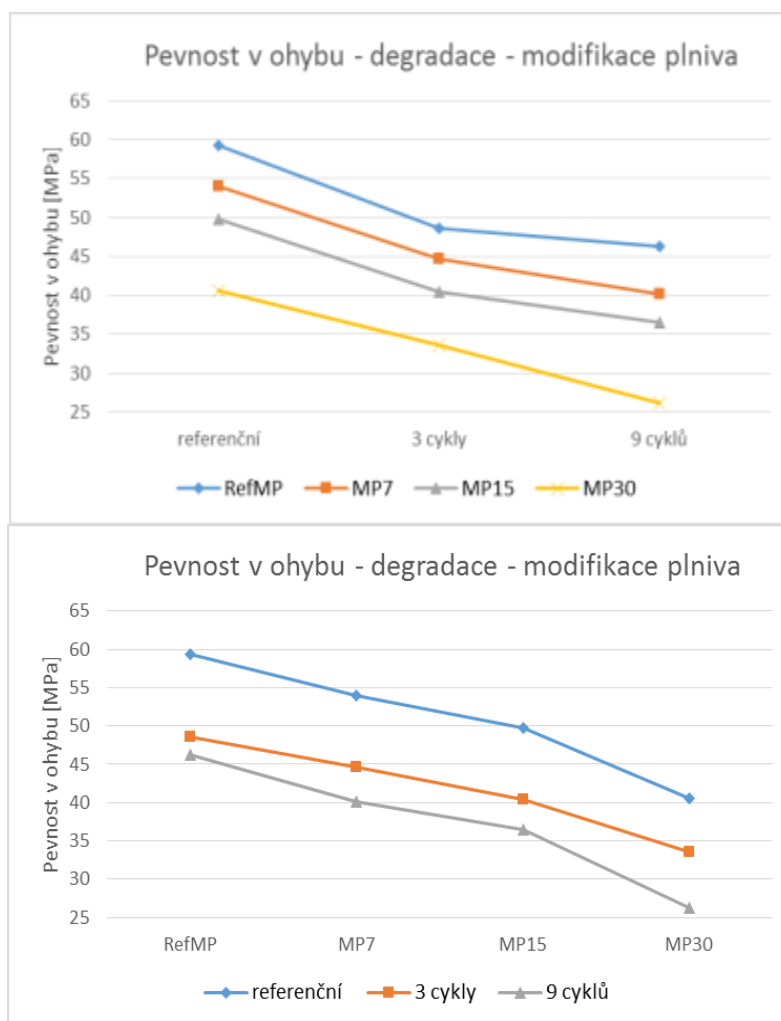
Graf 59 Poměrné prodloužení vzorků s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám: RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

Pokles hodnot tahových pevností byl zapříčiněn sníženou interakcí matrice s plnivem a neschopností sférického plniva optimálně přenášet tahové zatížení. Tuto skutečnost lze odvodit z výsledků hodnocení poměrného prodloužení zkušebních těles, které se po vystavení nepříznivým podmínkám prudce zvýšilo. Zvýšení poměrného prodloužení lze připisovat přenosu zatížení z větší míry maticí, která má tendence k vyššímu krípu. Pouze u zkušebních těles plněných dřevní moučkou zůstalo i poměrné prodloužení poměrně stabilní.

Vyhodnocení pevnosti v ohybu uvádí následující Tabulka 23 a Graf 60.

Tabulka 23 Ohybová pevnost vzorků s příměsí popílku v postprodukčním stavu a vystaveným 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám.

Označení vzorku	Pevnost v ohybu		
	[MPa]		
	referenční	3 cykly	9 cyklů
RefMM	59,3±2,630	48,6±0,791	46,3±0,526
MM15	54,0±0,765	44,7±0,405	40,1±0,515
MM27	49,8±1,546	40,4±0,475	36,5±0,714
MM55	40,6±3,219	33,6±1,453	26,2±1,002

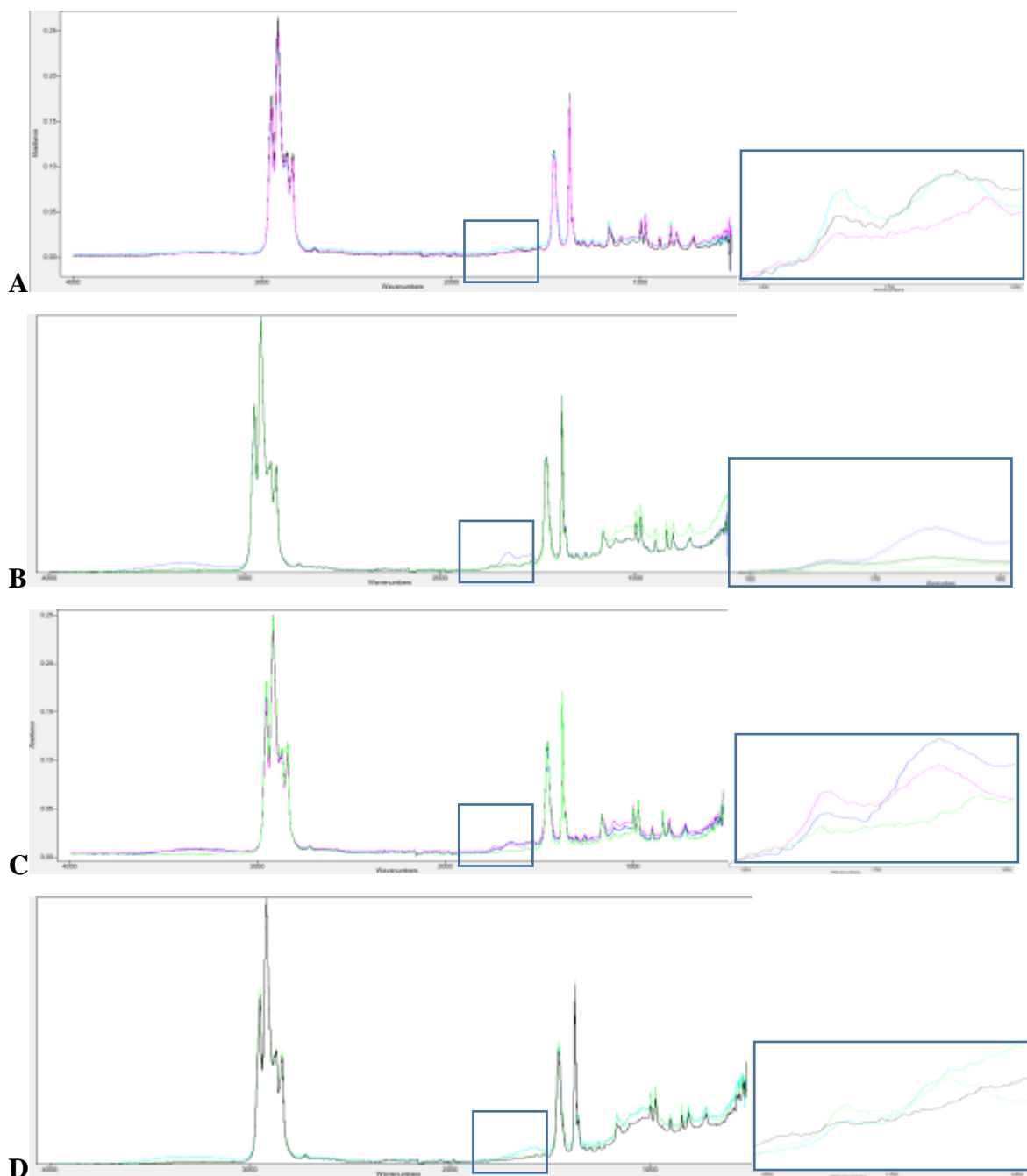
**Graf 60** Ohybová pevnost vzorků s příměsí popílku v postprodukčním stavu a vystaveným 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:

RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

Pevnost v ohybu vykázala obdobný trend jako tahová pevnost zkušebních těles. Po expozici nepříznivým podmínkám byl zaznamenán pokles jak s ohledem na typ vzorků, tak v závislosti na podílu příměsí plniva. Nejnižší hodnoty a nejprudší pokles vykázala zkušební tělesa plněná pouze popílkem. Po vystavení 9 cyklům se hodnota jejich tahové pevnosti snížila o 35,5 %.

Vliv degradace cyklickou expozicí byl sledován také prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie (posouzení změn v chemické struktuře povrchových vrstev).

Spektrogramy zkušebních těles uvádí následující Spektrogram 9. Obdobně jako u zkušebních těles s modifikovanou maticí, i zde byla sledována zejména oblast $1680-1800\text{ cm}^{-1}$, která odpovídá štěpným reakcím fotooxidace. U všech zkušebních těles byl zaznamenán nárůst spektrálního pásu na tomto vlnočtu.



Spektrogram 9 Naměřené spektrum zkušebních těles s podílem anorganického částicového plniva - popílku:

A = RefMP – pouze s dřevní moučkou: referenční (tmavě zelený), 3 cykly (bledě zelený), 9 cyklů (růžový)

B = MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku: referenční (bledě zelený), 3 cykly (tmavě zelený), 9 cyklů (modrý)

C = MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku: referenční (zelený), 3 cykly (modrý), 9 cyklů (růžový)

D = MP30 – pouze s popínkem: referenční (černý), 3 cykly (tyrkysový), 9 cyklů (zelený)

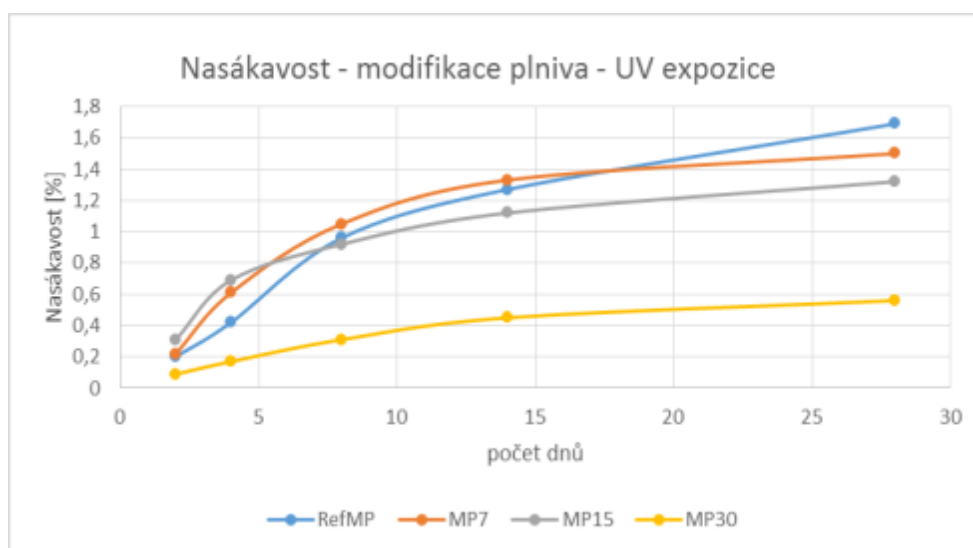
Zatížení expozicí UV záření

Druhý typ degradujícího prostředí byl vyvozen expozicí UV záření v ozařovací komoře. Zkušební tělesa byla ozařována kontinuálně, hodnoty sledovaných charakteristik byly stanoveny po 1000 hodinách ozařování. Hodnoceny byly fyzikální a mechanické charakteristiky a také změna chemické struktury.

Nasákavost po zkušebních těles byla stanovena po 2, 4, 8, 14 a 28 dnech ponoření do destilované vody. Vyhodnocení nasákavosti uvádí Tabulka 24 a Graf 61.

Tabulka 24 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem vystavených cyklické expozici vlhkosti, mrazu a vysoušení.

Nasákavost (počet dnů)	RefMP	MP7	MP15	MP30
	[%]	[%]	[%]	[%]
UV expozice				
2	0,20	0,22	0,31	0,9
4	0,42	0,61	0,69	0,17
8	0,96	1,05	0,92	0,31
14	1,27	1,33	1,12	0,45
28	1,69	1,5	1,32	0,56



Graf 61 Nasákavost zkušebních těles s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:

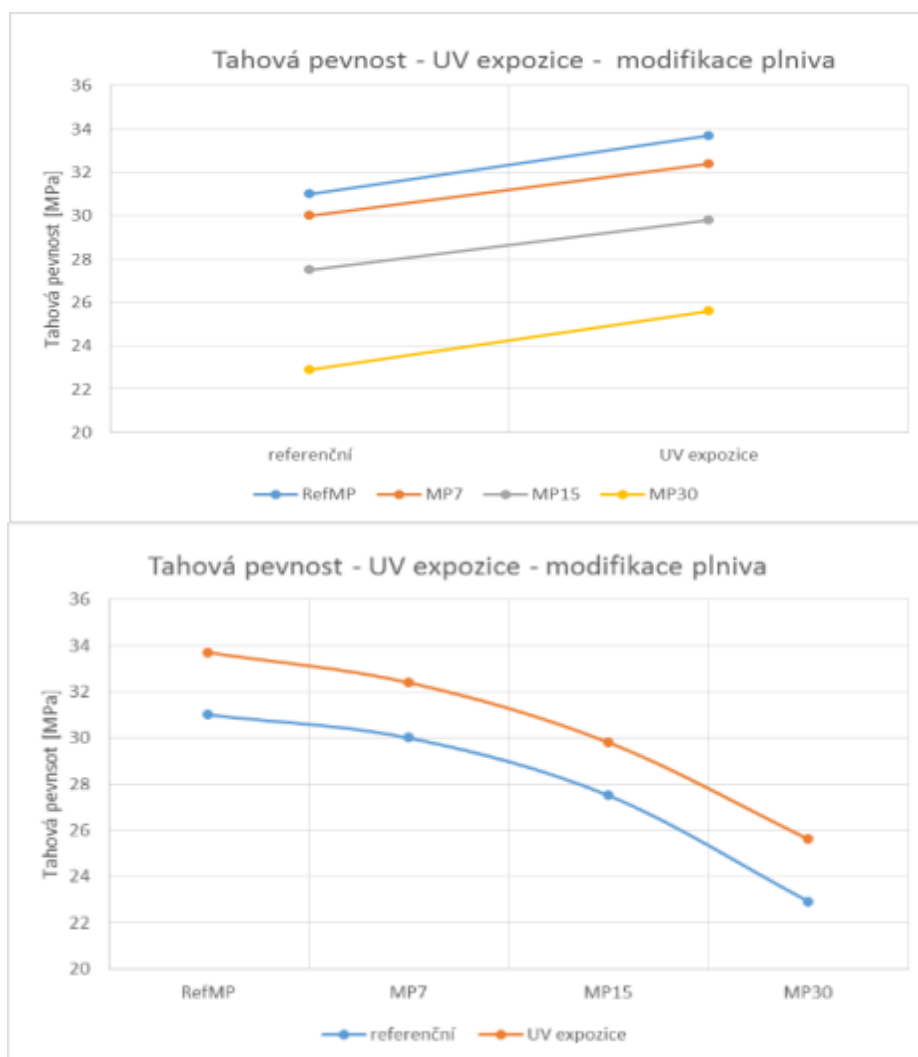
RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

Nasákavost zkušebních těles po expozici záření v UV komoře, obdobně jako u zkušebních těles s modifikací matrice, dosáhla nižších hodnot než u těles v postprodukčním stavu. Tato skutečnost je připisována dosíťování polymerní matrice indukovaném zářením. Nejnižší nasákavosti dosáhla zkušební tělesa plněná pouze popílkem. Průběh nasákavosti degradovaných zkušebních těles po 28 denním ponoření do destilované vody vykazoval stejný trend jako u těles v postprodukčním stavu.

Vyhodnocení tahových charakteristik uvádí následující Tabulka 25 a Graf 62.

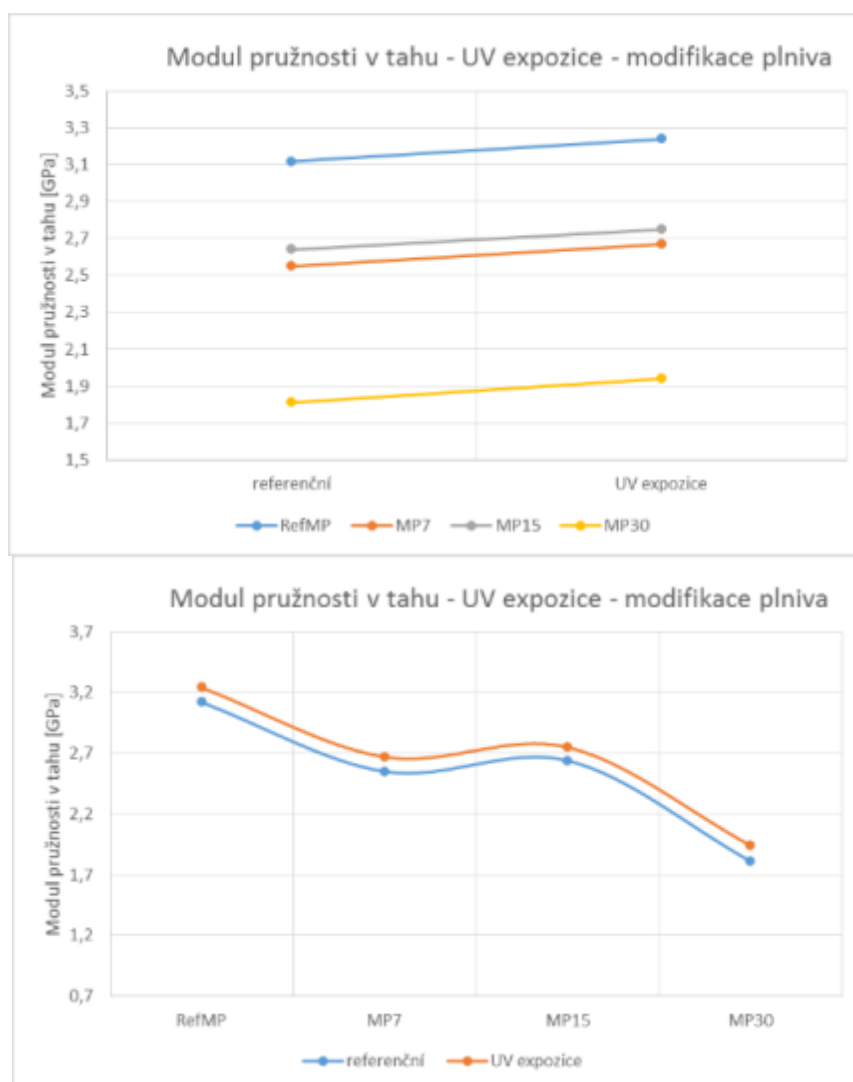
Tabulka 25 Vyhodnocení tahových charakteristik zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matrici recyklátem vystavených UV degradaci.

Označení vzorku	Referenční			UV expozice		
	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení	Tahová pevnost	Modul pružnosti	Poměrné prodloužení
	[MPa]	[GPa]	[-]	[MPa]	[GPa]	[-]
RefMM	31,0±0,292	3,12±0,0350	0,051	33,7±0,763	3,24±0,240	0,043
MM15	30,0±0,311	2,55±0,414	0,046	32,4±0,2015	2,67±0,096	0,039
MM27	27,5±1,646	2,64±0,268	0,047	29,8±0,617	2,75±0,122	0,041
MM55	22,9±0,636	1,81±0,203	0,063	25,6±0,321	1,94±0,069	0,060



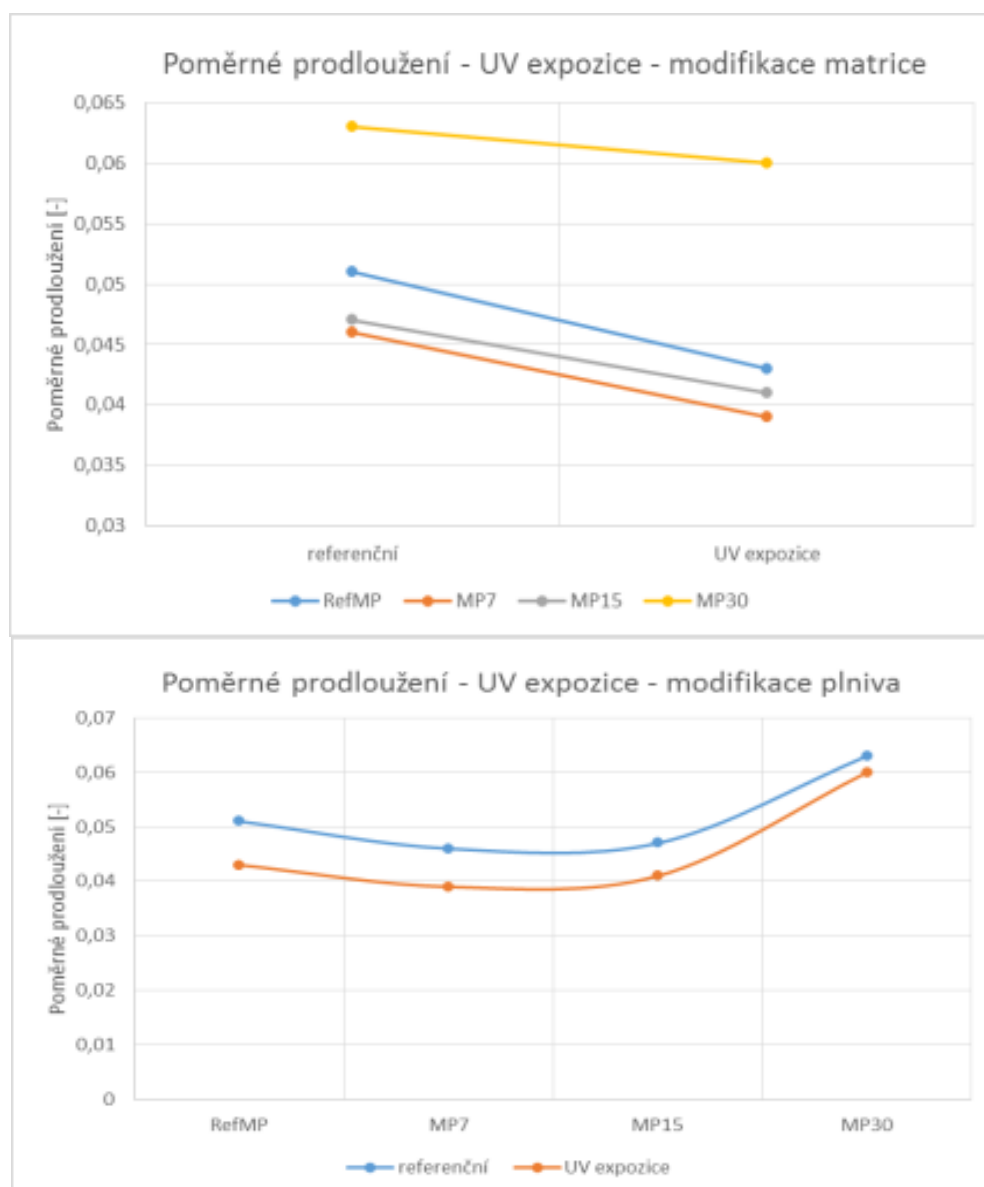
Graf 62 Tahová pevnost vzorků s příměsí popílku po UV expozici a v postprodukčním stavu: RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

UV expozice se rovněž projevila na tahových charakteristikách připravených zkušebních těles. Tahová pevnost všech zkušebních těles vykázala mírnou narůstající tendenci, což je obdobně jako u nasákavost připisováno dosíťování polypropylénové matrice vlivem působení UV záření.



Graf 63 Tahové charakteristiky vzorků s příměsí popílku po UV expozici a v postprodukčním stavu: RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popínkem (30 %).

Modul pružnosti v tahu dosáhl u všech zkušebních těles podobného průběhu. Po expozici UV záření došlo k mírnému nárůstu hodnot, což je připisováno dosít'ování matrice. U všech zkušebních těles bylo dosaženo přibližně stejného nárůstu.



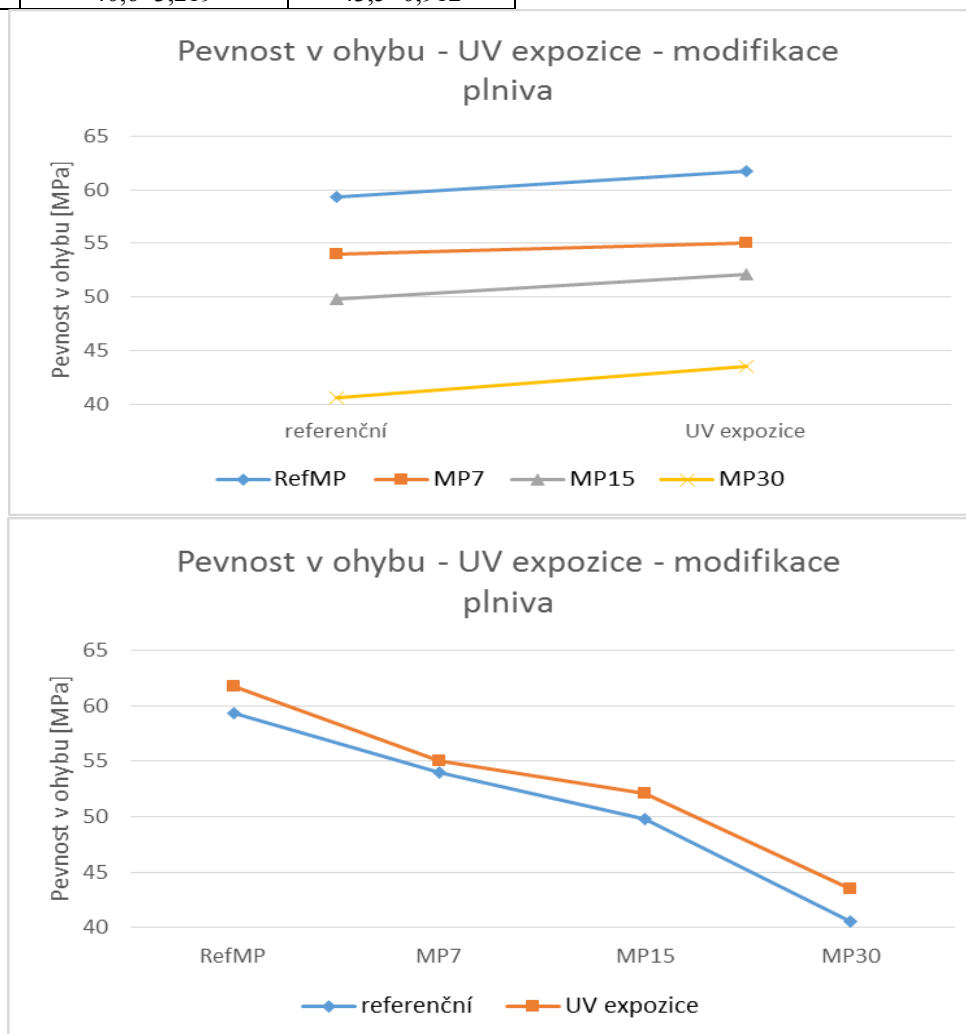
Graf 64 Tahové charakteristiky vzorků s příměsí popílku po UV expozici a v postprodukčním stavu: RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

Vyhodnocení poměrného prodloužení ukázalo mírný pokles, což odpovídá výsledkům tahové pevnosti, jelikož se předpokládá, že vyšší krystalinita polymeru zvyšuje jeho hustotu a tedy komplexně ovlivňuje typickou deformaci tahem polymerů. Nejvyšších hodnot poměrného prodloužení dosáhla zkušební tělesa plněná pouze popílkem, u nichž převážnou část zatížení přenáší matrice. Dosažená tahová pevnost zkušebních těles plněných pouze popílkem odpovídá deklarované pevnosti neplněného plastu.

Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles vystavených UV degradaci uvádí následující Tabulka 26 a Graf 65.

Tabulka 26 Vyhodnocení ohybové pevnosti zkušebních těles s příměsí anorganického plniva vystavených UV degradaci.

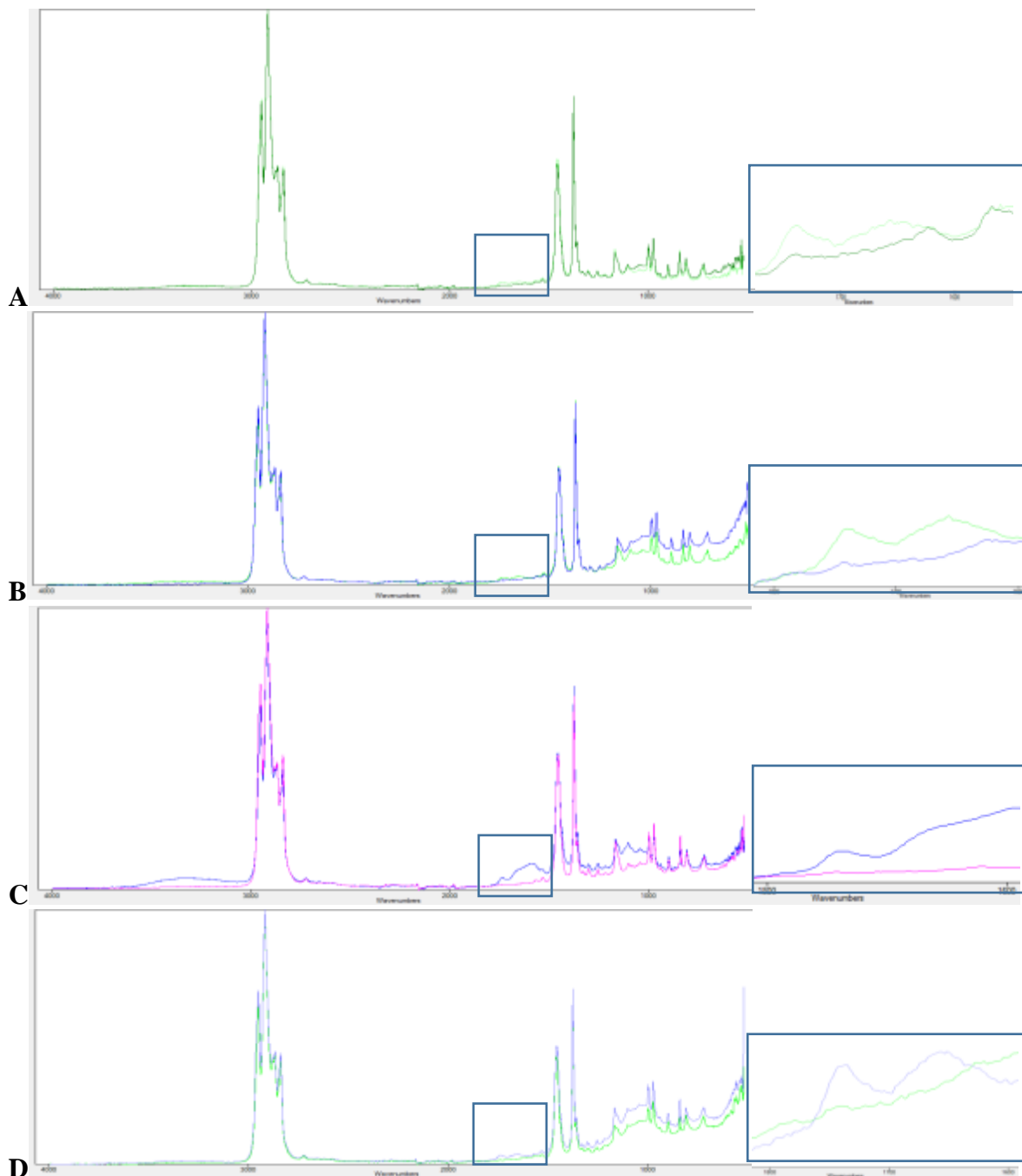
Označení vzorku	Pevnost v ohybu [MPa]	
	referenční	UV expozice
RefMP	59,3±2,630	61,7±0,560
MP7	54,0±0,765	55,0±0,742
MP15	49,8±1,546	52,1±1,105
MP30	40,6±3,219	43,5±0,912



Graf 65 Ohybová pevnost zkušebních těles s příměsí anorganického plniva vystavených UV záření: RefMP – pouze s dřevní moučkou, MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku, MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku, MP30 – pouze s popílkem (30 %).

Ohybová pevnost zkušebních těles měla vlivem expozice UV záření rovněž mírnou narůstající tendenci. Hodnoty pevnosti zůstaly stabilní a vykázaly nárůst v průměru o 2-3 MPa. Sekundární zkoušení těles vystavených degradačním vlivům UV záření bylo realizováno posouzením chemické struktury prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie, které uvádí následující Spektrogram 10. Vyhodnocení spektrogramů poukázalo na přítomnost karbonylových a vinylových funkčních skupin u degradovaných vzorků, což je v souladu s předpokladem porušování osvitové plochy a štěpení probíhajících v rámci

Norishových reakcí. U zkušebního tělesa s 50% příměsí popílku se projevilo také odhalení zrn plniva, které odpovídá spektrálnímu pásu na vlnočtu $1730-1740\text{ cm}^{-1}$, který je spájen s holocelulózou. Výrazný nárůst intenzity širokého spektrálního pásu na vlnočtu $1510-1600\text{ cm}^{-1}$ odpovídá aromatickým uhlovodíkům v ligninu.



Spektrogram 10 Naměřené spektrum zkušebních těles s podílem anorganického částicového plniva - popílku:

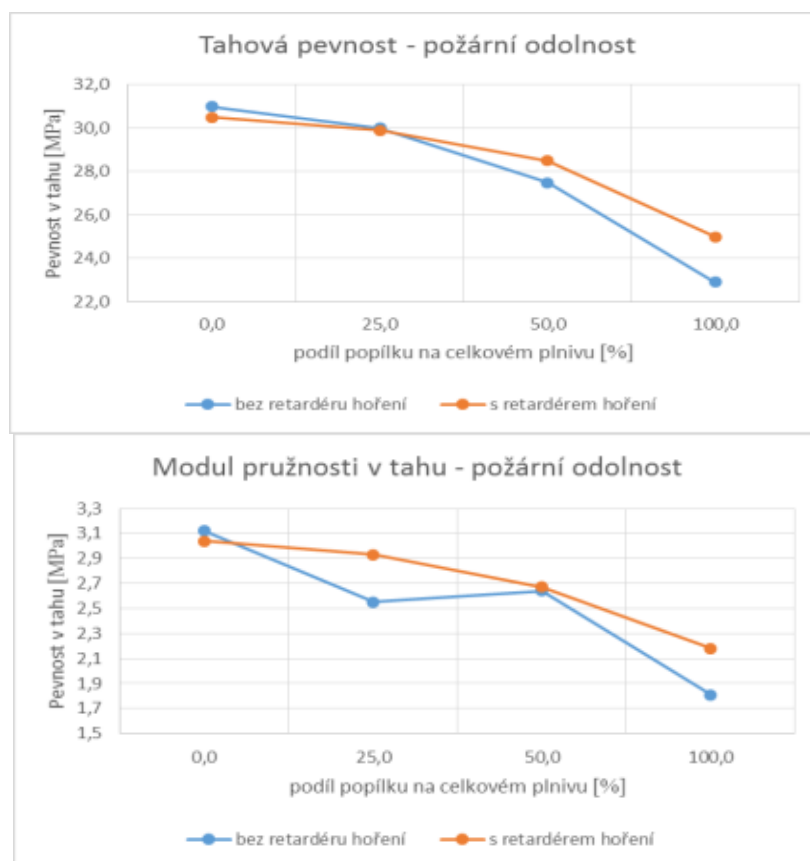
- A = RefMP – pouze s dřevní moučkou: referenční (tmavě zelený), UV expozice (bledě zelený)
 B = MP7 – s 22,5% podílem dřevní moučky a 7,5% podílem popílku: referenční (modrý), UV expozice (zelený)
 C = MP15 – s 15% podílem dřevní moučky a 15% podílem popílku: referenční (růžový), UV expozice (modrý)
 D = MP30 – pouze s popínkem: referenční (zelený), UV expozice (modrý)

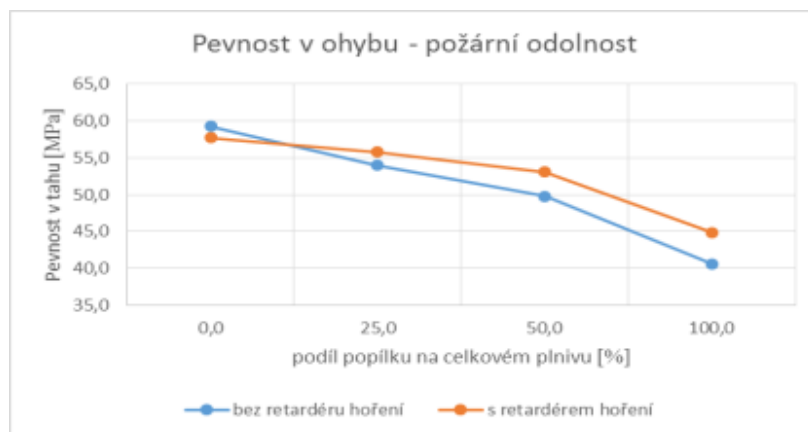
4.3.3 Požární odolnost

Požární odolnost modifikovaného dřevoplastového kompozitu byla stanovena ve spolupráci s VŠB-TUO. U připravených zkušebních těles bylo primárně provedeno posouzení vlivu přísady retardéru hoření na pevnostní charakteristiky a poté stanovení kyslíkového čísla a hořlavosti. Vyhodnocení tahové pevnosti, modulu pružnosti v tahu a ohybové pevnosti a jejich srovnání se stejnými veličinami u zkušebních těles bez obsahu retardéru hoření uvádí následující Tabulka 27 a Graf 66.

Tabulka 27 Vyhodnocení ohybové pevnosti zkušebních těles s příměsí anorganického plniva vystavených UV degradaci.

Parametr/označení	Bez retardéru hoření				S retardérem hoření			
	RefMP	MP7	MP15	MP30	RefPO	PO4	PO9	PO18
Tahová pevnost [MPa]	31,0	30,0	27,5	22,9	30,5	29,9	28,5	25,0
Modul pružnosti v tahu [GPa]	3,1	2,6	2,6	1,8	3,04	2,93	2,67	2,18
Pevnost v ohybu [MPa]	59,3	54,0	49,8	40,6	57,7	55,8	53,1	44,9





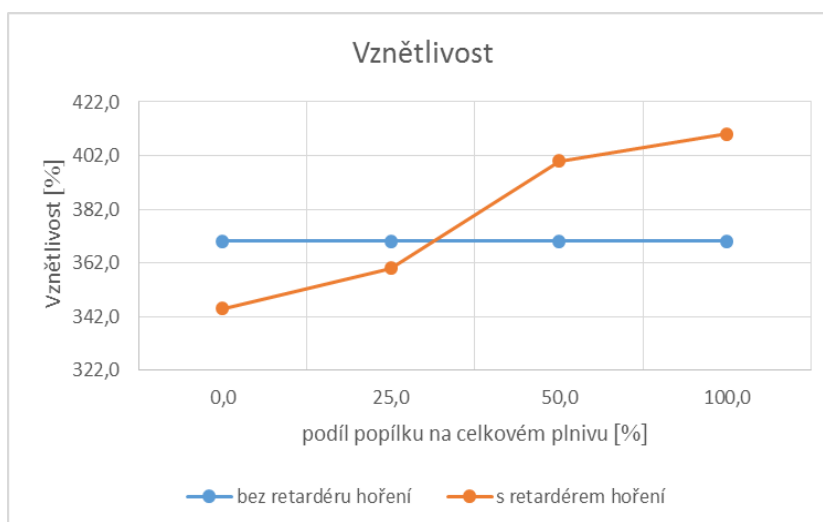
Graf 66 Pevnostní charakteristiky zkušebních těles bez a s obsahem retardéru hoření v závislosti na podílu popílku v plnivu.

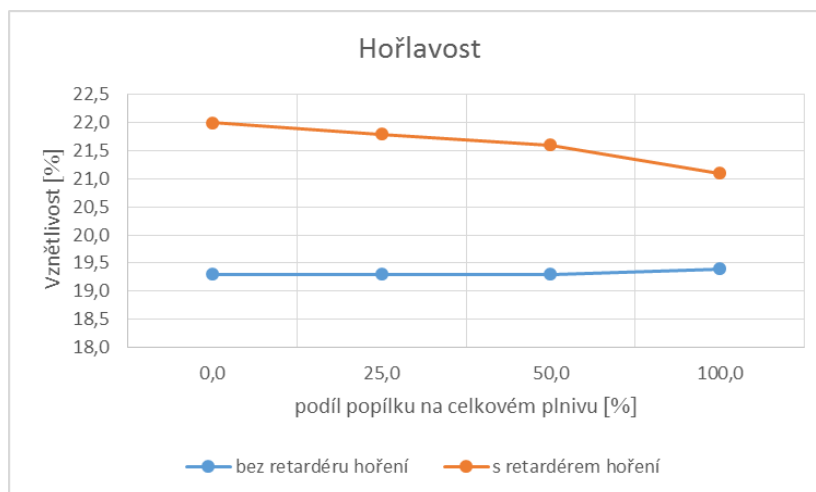
Pevnostní charakteristiky zkušebních těles obsahujících retardér hoření byly v porovnání s hodnotami dosaženými u neupravovaných modifikovaných vzorků vyšší. Tato skutečnost je spojena s celkově nižším obsahem popílku v surovinové směsi a posléze ve struktuře kompozitu. U zkušebních těles, která obsahovala popílek, byla vlivem nižšího obsahu vláknového plniva zaznamenána nižší hodnota u všech sledovaných parametrů.

Stanovení požární odolnosti bylo realizováno prostřednictvím dvou charakterizujících veličin – vznětlivosti (teploty vzplanutí) a hořlavosti metodou kyslíkového čísla. Vyhodnocení obou vlastností u vzorků s i bez obsahu retardéru uvádí následující Tabulka 28 a Graf 67.

Tabulka 28 Vyhodnocení ohybové pevnosti zkušebních těles s příměsí anorganického plniva vystavených UV degradaci, upraveno dle [54].

Parametr/označení	Bez retardéru hoření				S retardérem hoření			
	RefMP	MP7	MP15	MP30	RefPO	PO4	PO9	PO18
Vznětlivost [°C]	370,0	370,0	370,0	370,0	345	360	400	410
Hořlavost [-]	19,3	19,3	19,3	19,4	22	21,8	21,6	21,1





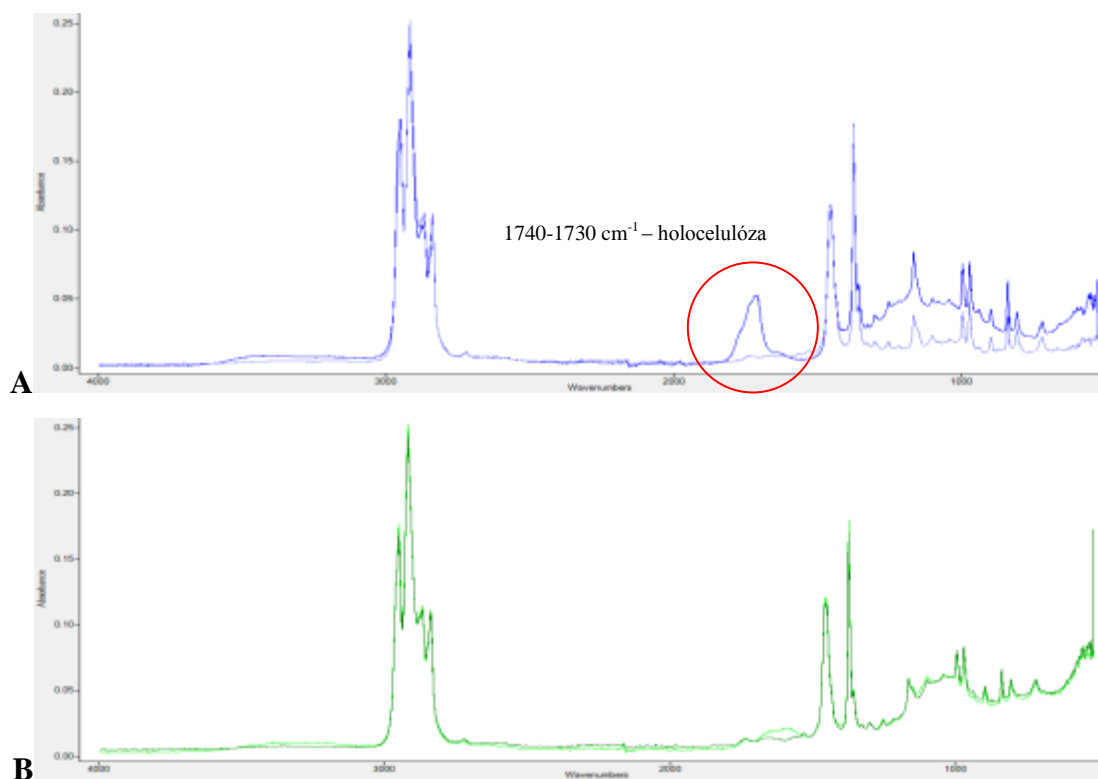
Graf 67 Požární charakteristiky zkušebních těles bez a s obsahem retardéru hoření v závislosti na podílu popílku v plnivu, upraveno dle [54].

Pozitivní vliv příměsi popílku na požární vlastnosti kompozitu se v návaznosti na vyhodnocení sledovaných vlastností ukázal jako nejednotný. Teplota vzplanutí u všech zkušebních těles, které neobsahovaly retardér hoření, zůstala poměrně stabilní, u vzorků s retardérem hoření postupně s rostoucím obsahem popílku stoupala, což lze považovat za pozitivní jev.

Hořlavost stanovená hodnotou kyslíkového čísla, které určuje spotřebu kyslíku při procesu hoření (podporující tento proces), rovněž nepotvrdila pozitivní vliv příměsi. Zkušební tělesa neobsahující popílek vykazovala stejnou hodnotu kyslíkového čísla, u vzorků obsahujících pouze popílek se tato hodnota jen velmi mírně zvýšila. Zkušební tělesa obsahující retardér hoření dosáhla v tomto směru lepších hodnot, nejvyšší hodnota však byla dosažena u zkušebních těles bez obsahu popílku, postupné snižování kyslíkového čísla s narůstajícím podílem popílku lze hodnotit jako negativní.

4.3.4 Vliv UV stabilizátoru

Přidruženým testováním příměsi popílku ve struktuře dřevoplastového kompozitu bylo hodnocení vlivu přídatku UV stabilizátoru. Pro potřeby hodnocení této vlastnosti byla připravena zkušební tělesa s a bez přídatku UV stabilizátoru (0,75 % a 0 %) pro typy zkušebních těles s maximálním podílem dřevní moučky a popílku (tedy v obou případech 30 %) Vliv přídatku UV stabilizátoru byl hodnocen prostřednictvím infračervené absorpční spektroskopie po vystavení kontinuálnímu osvětlení v UV komoře (1000 hodin). Naměřené spektrogramy uvádí následující Spektrogram 11.



Spektrogram 11 Naměřené spektrum zkušebních těles po 1000 hodinách ozařování v UV komoře:
A = zkušební tělesa plněná pouze dřevní hmotou: s UV stabilizátorem (bledě modrý), bez UV stabilizátoru (tmavě modrý)
B = zkušební tělesa plněná pouze popílkem: s UV stabilizátorem (tmavě zelený), bez UV stabilizátoru (bledě zelený)

Vliv obsahu UV stabilizátoru na chemickou strukturu kompozitu je zjevný ze spektrogramů označených jako A. U zkušebních těles, která neobsahovala přísadu, došlo k rychlejší destrukci povrchové plochy a odhalení vláken dřevní hmoty, která jsou charakterizována spektrálním pásem na vlnočtu $1730\text{--}1740\text{ cm}^{-1}$ (holocelulóza), který dále překrývá spektrální pásy vinylových a karboxylových funkčních skupin vznikajících štěpením makromolekul polymeru.

Zkušební tělesa obsahující pouze popílek se neprojevila výraznou změnou v chemické struktuře matrice. Rozdíl v intenzitě spektrálních pásmů funkčních skupin štěpení u vzorku bez UV stabilizátoru není v porovnání se vzorkem s UV stabilizátorem výrazný. Lze tedy usuzovat na pozitivní vliv příměsi na odolnost proti UV záření.

4.4 Etapa IV – Závěrečné vyhodnocení

V rámci etapy II a etapy III bylo realizováno testování připravených zkušebních těles s ohledem na zvolené charakteristiky definující jejich použití v požadované aplikaci. Vyhodnocení testování bylo rovněž provedeno separátně pro každý typ modifikace zvlášť.

4.4.1 Vyhodnocení modifikace matrice

Matrice dřevoplastového kompozitu byla modifikována 15; 27,5 a 55% podílem recyklátu v polypropylénové matrici. Pro modifikaci byl vybrán běžně dostupný polymer, který měl ovšem v porovnání s primárním polymerem odlišnou chemickou strukturu. Studium vlastností zkušebních vzorků kompozitu bylo směřováno do dvou specifických oblastí – k posouzení vlivu modifikace na základní charakteristiky v postprodukčním stavu kompozitu a po expozici nepříznivým podmínkám simulujícím venkovní aplikaci.

Z testování základních vlastností v postprodukčním stavu a po vystavení nepříznivým podmínkám vyplynuly tyto výstupy:

Matrice připravená směsí polymeru vykázala komplexně horší vlastnosti než matrice připravená pouze z recyklátu

V porovnání s kompozity s jednodruhovou maticí dosáhla zkušební tělesa připravená jako kompozit se směsnou maticí výrazně horších vlastností. Nejvyšší nasákavost po 28 dnech dosáhla zkušební tělesa s maticí obsahující 50% podíl recyklátu, obdobně pevnost v tahu, modul pružnosti i pevnost v ohybu byly u zkušebních těles se směsnou maticí výrazně nižší než u kompozitů s maticí jednodruhovou. Tato skutečnost je připisována nehomogenní struktuře způsobené rozdílnou teplotou tavení homopolymeru a kopolymeru. Jejím vlivem dochází ve struktuře matrice k vzniku fází s různou krystalinitou, které působí jako další typ plniva, a zapříčiňují nerovnoměrné obalení zrn plniva, a implicitně nedostatečnou kompaktnost celé kompozitní struktury. Slabá interakce matrice a plniva byla potvrzena také studiem morfologie lomové plochy zkušebních těles po zkoušce tahové pevnosti. Ta ukázala, že při zatížení přenáší tahové napětí kompozitů se směsným polymerem matrice, jelikož k porušení došlo na styku ploch plniva a matrice, kdežto u zkušebních těles s jednodruhovou maticí převládalo porušení ve vláknech. Této skutečnosti odpovídají i výsledky poměrného prodloužení, které bylo vyšší u zkušebních těles se směsnou maticí.

V nepříznivém prostředí dochází k rychlejší degradaci kompozitu s recyklátem v matrici

Studium vlastností zkušebních těles kompozitů s modifikovanou maticí vystavených působení nepříznivého prostředí poukázalo na výrazný pokles mezi hodnotami stanovenými po 3 a 9 cyklech expozice cyklického působení vlhkosti, mrazu a vysoušení. Porušení struktury matrice kompozitu se promítlo do zvýšené 28denní nasákavosti i snížení pevnostních charakteristik v porovnání s původními hodnotami referenčních vzorků stanovených základním laboratorním testováním. Zatímco tahová i ohybová pevnost zkušebních těles s maticí z primárního polymeru zůstala poměrně stabilní, u kompozitů ze

směsného polymeru i z recyklátu došlo k jejímu snížení pod základní hodnotu blíží se hodnotě neplněného plastu. Tento jev je jednak způsoben charakterem polymeru, jelikož primární polypropylénový kopolymer se vyznačuje deklarovanou mrazuvzdorností, jednak senzitivitou recyklátu k působení vlhkosti.

Při expozici UV záření dochází i navzdory fotooxidaci povrchové vrstvy v prvotní fázi ke zlepšení vlastností kompozitu

Vliv zatěžování kontinuálním osvitem v UV komoře měl opačný efekt, než bylo primárně předpokládáno. UV záření indukovalo další polymeraci polymeru, která se projevila především u zkušebních těles s vyšším obsahem primárního polymeru. Z této skutečnosti lze usuzovat na působení UV záření převážně na primární polymer. Porušení povrchových vrstev fotooxidací bylo potvrzeno vyhodnocením infračervených absorpčních spektrogramů, na nichž byl patrný vývoj produktů Norishových reakcí.

4.4.2 Vyhodnocení modifikace plniva

Modifikace plniva dřevoplastového kompozitu byla realizována náhradou 25, 50 a 100 % dřevní moučky popílkem o široké granulometrii. V návaznosti na provedenou rešerši bylo předpokládáno, že příměsí bude dosaženo kompaktnější struktury kompozitu alepší se jak primární (fyzikální a mechanické), tak sekundární vlastnosti.

Z testování základních vlastností v postprodukčním stavu a po vystavení nepříznivým podmínkám vyplynuly tyto výstupy:

Modifikace plniva má negativní vliv na primární vlastnosti důležité pro předpokládanou aplikaci

Testování vlastností kompozitních zkušebních těles s modifikací plniva v postprodukčním stavu poukázalo na výrazné snížení pevnostních charakteristik s narůstajícím podílem příměsí. Zkušební tělesa, která obsahovala pouze anorganické sférické plnivo, nedosáhla ani deklarované pevnosti v tahu neplněného polymeru, což je důsledek nedostatečného přilnutí matrice k plnivu, a tedy minimálního přenosu zatížení na jeho zrna, které navíc není schopno optimálně tomuto zatížení odolávat. Tuto skutečnost podporují SEM snímky lomové plochy, na nichž je rozeznatelné porušení na styku fází. Pokles pevností a modulu pružnosti měl s narůstajícím podílem popílku ve struktuře kompozitu přibližně lineární průběh.

Obdobných výsledků však navzdory předpokladu bylo dosaženo také při testování pevnostních charakteristik kompozitních zkušebních těles vystavených degradujícím vlivům. Po vystavení působení faktorů zrychleného stárnutí dosáhla zkušební tělesa mnohem nižších

hodnot tahových i ohybových pevností, přestože se předpokládala blokáce vniku vlhkosti jemnou frakcí popílku a tím zvýšená odolnost materiálu.

Modifikace plniva má pozitivní vliv na sekundární vlastnosti kompozitu

Základní laboratorní testování dále poukázalo na pozitivní vliv příměsi na nasákavost kompozitu v postprodukčním stavu. V porovnání se zkušebními tělesy obsahujícími pouze dřevní moučku dosáhla zkušební tělesa plněná pouze popílkem čtvrtinové 28denní nasákavosti. Vliv příměsi se projevil také u zkušebních těles se směsný plnivem, u nichž hodnoty nasákavosti dosáhly v porovnání s referenčními dřevoplastovými zkušebními tělesy o téměř 17 resp. 23 % nižších hodnot.

Pozitivní impakt má příměs popílku také na vznětlivost kompozitu, ovšem pouze v případě, že je současně směs vylepšena retardérem hoření. Hodnoty kyslíkového čísla se příměsí v porovnání s dřevoplastovými zkušebními tělesy podstatně snížily. Studium vlivu příměsi na působení UV záření u nestabilizovaných zkušebních těles byl odhalen pozitivní vliv také na odolnost v této expozici. Zatímco u zkušebního tělesa dřevoplastového kompozitu neošetřeného stabilizátorem došlo po expozici UV záření k odhalení zrn plniva charakterizované přítomností spektrálních pásů holocelulózy, zkušební tělesa plněná pouze popílkem měla po expozici povrch narušený pouze mírně. Infračervený absorpční spektrogram obsahoval pouze spektrální pásy produktů Norishových reakcí nízké intenzity.

5 Diskuze výsledků

Předkládaná disertační práce byla zaměřena na posouzení možností využití sekundárních surovin jako potenciálních modifikujících elementů ve výrobě dřevoplastového kompozitu. Charakter těchto elementů byl zvolen na základě obšírné rešerše aktuálních odborných publikací zabývajících se danou problematikou. Analýzou možných surovin byly vybrány dva směry modifikace WPC materiálu, a to modifikace matrice recyklovaným polymerem a modifikace plniva anorganickými sférickými částicemi.

V rámci experimentální části bylo následně provedeno posouzení obou typů modifikace dřevoplastového kompozitu druhotnými surovinami. Pro modifikaci matrice byl vybrán běžně dostupný recyklát chemismem příbuzný primárnímu polypropylenu tvořícímu matici. Pro modifikaci plniva byla zvolena sférická anorganická příměs popílku široké frakce, která měla přispět k celkové kompaktnosti struktury materiálu, a být tak prospěšná zejména s ohledem na **životnost** kompozitu.

U obou typů modifikovaných kompozitů bylo realizováno laboratorní zkoušení za účelem stanovení základních fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností a vzhledem k předpokládané aplikaci v exteriéru také vystavení nepříznivým podmínkám zrychleného testování životnosti. Zkušební tělesa modifikovaná anorganickou příměsí byla dále posuzována s ohledem na požární a UV stabilizační vlastnosti. Z výsledků provedeného testování vyplynuly následující skutečnosti:

- dřevoplastový kompozit připravený z primárního polymeru dosáhl v oblasti fyzikálních a fyzikálně mechanických vlastností optimálních hodnot jak v postprodukčním, tak v degradovaném stavu,
- dřevoplastový kompozit modifikovaný recyklátem polymeru vykázal
 - poměrně lepší vlastnosti v případě, že matrice byla v celém objemu tvořena recyklátem, vlivem rozdílné teploty tání bylo u směsných matic dosaženo významného snížení hodnot sledovaných vlastností (zejména pevnostních),
 - dřevoplastový kompozit s podílem recyklátu v matici podléhá rychleji degradujícím faktorům, zejména v případě, že recyklát tvoří pouze část objemu matrice,
- anorganické sférické plnivo – popílek dané široké frakce
 - výrazně snižuje již postprodukční fyzikálně mechanické vlastnosti kompozitu,
 - naopak s narůstajícím podílem popílku se snižuje nasákavost kompozitu, a to i po vystavení degradujícímu prostředí,

- z výsledků sekundárních vlastností (požární odolnost a UV stabilita) lze usuzovat na mírně pozitivní vliv příměsi.

Uplatnění modifikovaného dřevoplastového kompozitu v aktuálně užívaných aplikacích, tedy ve formě exteriérové náhrady masivního dřeva pro nenosné konstrukce většího rozsahu (podlahové a obkladové prvky), lze na základě dosažených výsledků **využít** zejména WPC s modifikovanou matricí. Náhrada primárního polymeru recyklátem by měla být ovšem realizována v celém rozsahu, aby bylo zabráněno vzniku nehomogenit ve struktuře polymeru (fází s různou teplotou tání a krystalinitou). Zkoušený typ polypropylénu vykázal dostatečné pevnostní charakteristiky odpovídající požadavku aplikace, vzhledem k vlivu degradujících faktorů by však bylo optimální využití recyklátu kopolymeru (dosahujícího vhodné mrazuvzdornosti), který ovšem není běžně v dané vzhledové kvalitě dostupný (obvykle obsahuje pigmenty a aditiva, která mají vliv na pocitovou úroveň kompozitu). Před vlastním zahájením výroby je tak vždy nutné stanovit počáteční charakteristiky recyklátu, které by se neměly odchylovat od standardně užívané primární suroviny.

Aplikace materiálu připraveného modifikací plniva v exteriéru se ukázala **jako nevhodná**. Testovaná zkušební tělesa dosáhla velmi nízkých hodnot pevnostních charakteristik, které se expozicí v nepříznivých podmínkách ještě snížily. Použití tohoto materiálu by bylo vzhledem k dobrým požárním vlastnostem vhodnější do interiéru. Jeho uplatnění je však podmíněno ověřením odolnosti vůči chemickým přípravkům.

6 Přínos práce

Disertační práce byla zaměřená na hodnocení možností modifikace dřevoplastového kompozitu druhotnými surovinami zvoleného charakteru, který vycházel z rešerše odborných studií provedených na dané téma. Jednoznačný přínos práce lze spatřovat v provedení komplexní rešerše možností modifikace dřevoplastového kompozitu, která odpovídá současné úrovni poznání v dané oblasti. Kromě souborné charakteristiky nemodifikovaného materiálu, jeho vlastností a způsobu jejich zkoušení, se práce zaměřovala také na identifikaci běžné praxe zkoušení dřevoplastového kompozitu v různých modifikacích.

Úplná náhrada matrice odpadním polymerem **se experimentálně ukázala jako vhodný** způsob modifikace dřevoplastového kompozitu využitelný například v oblasti drobného zahradního zboží případně plotových systémů, kde nejsou kladeny zvýšené nároky na tahovou a ohybovou pevnost materiálu při dlouhodobé expozici exteriéru. Modifikace anorganickým částicovým plnivem je vzhledem k vlastnostem spíše vhodná pro uplatnění v interiéru například jako přidružený materiál nábytkářské výroby. Z tohoto hlediska lze považovat za hlavní přínos disertační práce posouzení vlastností těchto nově vyvíjených materiálů a návrh jejich potenciálního uplatnění v průmyslu.

Přínos mající dopad v **experimentálním vývoji** lze spatřovat v možnosti uplatnění modifikovaných WPC prvků ve stavebním průmyslu s přidanou hodnotou environmentální příznivosti. Ta bude zajištěná jednak zpracováním odpadního polymeru, jednak snížením dopadu výroby dřevoplastového kompozitu na životní prostředí. Současně je navrženým způsobem posílena ekonomická efektivita výroby, která se váže především na uplatnění levnějších surovin. Ta se v konečném důsledku promítne do konečné ceny produktů (prvků) vyrobených z vyvíjeného materiálů.

Za **vědecký přínos** disertační práce lze rovněž považovat provedený základní výzkum vlastností konkrétních typů modifikovaných kompozitů, jehož výsledky se stanou podkladem pro aplikovaný výzkum.

7 ZÁVĚR

Studium problematiky modifikace dřevoplastového kompozitu druhotnými surovinami realizované v disertační práci bylo rozděleno do dvou rámcových sekcí zahrnujících **teoretickou rešerši** aktuálních odborných poznatků a **experimentální zkoušení** vlivu dvou zvolených **typů modifikace** na vlastnosti WPC materiálu. Teoretická rešerše se dále členila do tří specifických subsekcí orientovaných na komplexní posouzení charakteristik materiálu a možností uplatnění druhotných surovin při jeho výrobě. Základním východiskem studia dřevoplastového kompozitu byl rozbor jednotlivých složek, které se běžně pro jeho výrobu používají, tedy obvyklých termoplastů pro matrici, parametrů dřevní hmoty včetně forem její úpravy pro zvýšení kompatibility s matricí, přísad a příměsí, které se podílejí na řízení vlastností materiálu, způsobů výroby a praktické aplikace. V rámci této subsekcce byla rovněž provedena definice metodiky zkoušení dřevoplastového kompozitu právě s ohledem na obvyklou aplikaci v oblasti stavebnictví. Byl brán zřetel na vývoj prvků pro potenciální uplatnění prvků převážně do exteriéru a vystavené tak nepříznivým podmínkám povětrnosti.

Návaznému rozboru pak byly podrobeny možnosti modifikace dřevoplastového kompozitu druhotnými surovinami se separátním zaměřením na charakter hlavních surovin pro výrobu, tedy termoplastovou matrici a přírodní plnivo. Rozbor byl z tohoto důvodu rozdělen na dvě subsekcce, v nichž byl samostatně analyzován efekt náhrady primární matrice dřevoplastového kompozitu odpadním polymerem a integrace různých typů příměsí modifikujících vlastnosti a chování plniva kompozitu.

Náplň experimentální části disertační práce byla založená na výstupech provedené rešerše a zaměřovala se na posouzení vlivu způsobu modifikace a modifikujících surovin na konečné hlavní aplikační vlastnosti dřevoplastového kompozitu. Posouzení bylo provedeno deskriptivní a komparativní analýzou stanovených hodnot vybraných vlastností, jež byly získány provedením laboratorních zkoušek. V rámci experimentální části byl separátně hodnocen vliv modifikace matrice kompozitu odpadním polypropylénem běžně dostupným ve formě regranulátu na komerčním trhu. Druhou modifikací byla náhrada plniva anorganickou částicovou příměsí vhodných zpracovatelských vlastností.

Hlavním záměrem experimentálních prací zabývajících se modifikací matrice byla verifikace uplatnění recyklátu, který by podpořil snížení environmentálního dopadu výroby dřevoplastového kompozitu a snížení ekonomické zátěže jeho výroby. Polypropylénová matrice byla modifikována částečnou příměsí a úplnou náhradou primárního termoplastu, přičemž jako referenční vzorek zde sloužil kompozit připravený z primárního kopolymeru

o stejném poměru složek a stejným výrobním procesem jako modifikovaná zkušební tělesa. Z výsledků provedených zkoušek, které se kromě základního laboratorního testování vzhledem k předpokládané exteriérové aplikaci zaměřovaly také na stanovení životnosti v expozici nepříznivých podmínek, vyplynula skutečnost, že **modifikace matrice recyklátem musí být kvůli optimální homogenitě provedena jako celková náhrada primárního polymeru**. Použitý typ polymeru se ukázal jako vhodný pouze zčásti. Vzhledem k nižší mrazuvzdornosti homopolymeru by modifikace měla být provedena recyklátem kopolymeru, u něž lze předpokládat stabilnější průběh pevností pod zatížením povětrností.

Druhá část experimentálního zkoušení modifikovaného dřevoplastového kompozitu byla zaměřená na posouzení vlivu příměsi popílku v jeho plnivu. Dřevní moučka byla v tomto případě nahrazena 25, 50 a 100% podílem anorganického částicového plniva s cílem definovat optimální množství této příměsi. Jak ale vyhodnocení provedených zkoušek ukázalo, **anorganická příměs měla výrazně negativní vliv na pevnostní charakteristiky materiálu již ve fázi základního postprodukčního laboratorního zkoušení, a to i v minimálním 25% podílu**. Tato skutečnost vylučuje použití takto modifikovaného dřevoplastového kompozitu v běžné aplikaci decking systémů. Působení expozice zrychleného stárnutí cyklickému vystavení vlhkosti, mrazu a zvýšeným teplotám pak vedlo k dalšímu snižování těchto hodnot i navzdory skutečnosti, že použitá matrice byla primární a tedy dosahovala požadované mrazuvzdornosti. Důvodem nízkých hodnot v oblasti pevnostních charakteristik byla nedostatečná interakce na rozhraní matrice a příměsi.

Na rozdíl od primárních charakteristik se **modifikace plniva pozitivně promítla do hodnot vlastností sekundárních**. Zkoušení požární odolnosti poukázalo na zvýšení teploty vznětlivosti materiálu, a také odolnosti proti UV záření při vyloučení stabilizace materiálu. Dobrých výsledků bylo dosaženo také u nasákavosti v základních laboratorních podmínkách. Tyto vlastnosti předurčují použití materiálu spíše v interiéru, případně volbu výrazně nižšího podílu příměsi.

Modifikace surovinového složení dřevoplastového kompozitu druhotnými surovinami představuje rozvíjející se oblast environmentálně přívětivých materiálu, které mohou nalézt uplatnění jak ve stavebnictví, tak v dalších průmyslových oblastech. Přestože částečná nebo úplná náhrada hlavních surovin pro výrobu dřevoplastového kompozitu druhotnými surovinami představuje oblast s vysokým potenciálem, je nutné před vlastním zahájením výroby vždy posoudit vhodnost vybraného typu modifikace, jelikož se tyto suroviny vyznačují značnou variabilitou parametrů na vstupu do výroby. V případě zahájení sériové

výroby produktů z dřevoplastového kompozitu modifikovaného druhotnou surovinou je tak nutné implementovat do předvýrobních procesů kontinuální kontrolu kvality vstupních surovin.

Použitá literatura

- [1] KIM, Jin-Kuk. a Kaushik. PAL. *Recent advances in the processing of wood-plastic composites*. New York: Springer, c2010. Engineering materials. ISBN 3642148778.
- [2] BY YATCHKO IVANOV, Valerii Cheshkov. *Polymer Composite Materials - Interface Phenomena & Processes*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001. ISBN 9789401096645.
- [3] ROWELL, Roger M. *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005. ISBN 0849315883.
- [4] VASILE, Cornelia a G. E. ZAIKOV. *New trends in natural and synthetic polymer science*. New York: Nova Science Publishers, c2006. ISBN 1594547726.
- [5] ANSELL, Martin P. *Wood composites*. Waltham, MA: Elsevier, 2015. ISBN 9781782424543.
- [6] KLYOSOV, A. A. *Wood-plastic composites*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2007. ISBN 0470148918.
- [7] AKOVALI, Güneri. *Polymers in construction*. Shawbury, U.K.: Rapra Technology Ltd., c2005.
- [8] ALI REZA KHARAZIPOUR .. (ED.). *Review of forests, wood products and wood biotechnology of Iran and Germany*. Göttingen: Univ.-Verl. Göttingen, 2009. ISBN 9783940344724.
- [9] LEMON, Craig M. in: XANTHOS, Marino (editor). *Functional fillers for plastics*. 2nd updated and enl. ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 9783527323616.
- [10] CAMPILHO, Raul D. S. G. *Natural fiber composites*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. ISBN 1482239000.
- [11] EDITED BY KRISTIINA OKSMAN NISKA AND MOHINI SAIN. *Wood-polymer composites*. Cambridge, U.K: Woodhead Pub, 2008. ISBN 9781845692728.
- [12] TOLINSKI, Michael. *Additives for polyolefins: getting the most out of polypropylene, polyethylene and TPO*. Oxford: William Andrew Publishing, 2009. ISBN 9780815520511.
- [13] CHANDA, Manas a SALIL K. ROY. *Industrial polymers, specialty polymers, and their applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 9781420080599.
- [14] *Biofiber reinforcement in composite materials*. Waltham, MA: Woodhead Pub., 2014. ISBN 9781782421221.
- [15] CHEREMISINOFF, Nicholas P. *Handbook of engineering polymeric materials*. New York: Marcel Dekker, c1997. ISBN 082479799X.

- [16] *Photochemical behavior of multicomponent polymeric-based materials*. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 9783319251943.
- [17] FRIEDRICH, Klaus a Ulf BREUER. *Multi-functionality of Polymer Composites Challenges and New Solutions*. Elsevier Science, 2015. ISBN 9780323264341.
- [18] VASILE, Cornelia. *Handbook of polyolefins*. 2nd ed., rev. and expanded /. New York: Marcel Dekker, c2000. *Plastics engineering* (Marcel Dekker, Inc.), 59.
- [19] *Advanced high strength fibre composites in construction*. Waltham, MA: Elsevier, 2016. ISBN 9780081004111.
- [20] MIGNEAULT, Sebastien, Ahmed KOUBAA, Fouad ERCHIQUI, Abdelkader CHAALA, Karl ENGLUND a Michael P. WOLCOTT. Effects of processing method and fiber size on the structure and properties of wood–plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2009, **40**(1), 80-85 [cit. 2017-01-12]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.10.004. ISSN 1359835x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X08002649>
- [21] STARK, Nicole M. a Laurent M. MATUANA. Surface chemistry and mechanical property changes of wood-flour/high-density-polyethylene composites after accelerated weathering. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2004, **94**(6), 2263-2273 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.1002/app.20996. ISSN 0021-8995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.20996>
- [22] STARK, Nicole M. a Laurent M. MATUANA. Characterization of weathered wood–plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2007, **92**(10), 1883-1890 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.06.017. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391007001942>
- [23] LA MANTIA, F.P. a M. MORREALE. Accelerated weathering of polypropylene/wood flour composites. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2008, **93**(7), 1252-1258 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.04.006. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391008001262>
- [24] BADJI, Célia, Lata SOCCALINGAME, Hélène GARAY, Anne BERGERET a Jean-Charles BÉNÉZET. Influence of weathering on visual and surface aspect of wood plastic composites: Correlation approach with mechanical properties and microstructure. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2017, **137**, 162-172 [cit. 2017-03-19]. DOI:

- 10.1016/j.polymdegradstab.2017.01.010. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391017300174>
- [25] FABIYI, James S. a Armando G. MCDONALD. Degradation of polypropylene in naturally and artificially weathered plastic matrix composites. *Maderas, Cienc. tecnol.* [online]. 2014, vol. 16, n.3 [citado 2017-03-19], pp.275-290. Dostupné z: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2014000300002&lng=es&nrm=iso. Epub 13-Jun-2014. ISSN 0718-221X.
- [26] TEUBER, Laura, Victoria-Sophie OSBURG, Waldemar TOPOROWSKI, Holger MILITZ a Andreas KRAUSE. Wood polymer composites and their contribution to cascading utilisation. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **110**, 9-15 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.04.009. ISSN 09596526. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652615003522>
- [27] TURKU, Irina, Anna KESKISAARI, Timo KÄRKI, Ari PUURTINEN a Pasi MARTTILA. Characterization of wood plastic composites manufactured from recycled plastic blends. *Composite Structures* [online]. 2017, **161**, 469-476 [cit. 2017-01-10]. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.11.073. ISSN 02638223. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263822316320025>
- [28] SOMMERHUBER, Philipp F., Johannes WELLING a Andreas KRAUSE. Substitution potentials of recycled HDPE and wood particles from post-consumer packaging waste in Wood–Plastic Composites. *Waste Management* [online]. 2015, **46**, 76-85 [cit. 2017-03-16]. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.09.011. ISSN 0956053x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X15301203>
- [29] BERTIN, Sylvie a Jean-Jacques ROBIN. Study and characterization of virgin and recycled LDPE/PP blends. *European Polymer Journal* [online]. 2002, **38**(11), 2255-2264 [cit. 2017-01-11]. DOI: 10.1016/S0014-3057(02)00111-8. ISSN 00143057. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0014305702001118>
- [30] ADHIKARY, Kamal B., Shusheng PANG a Mark P. STAIGER. Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering* [online]. 2008, **39**(5), 807-815 [cit. 2017-01-12]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2007.10.005. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135983680700145X>
- [31] KAZEMI, Yasamin, Alain CLOUTIER a Denis RODRIGUE. Mechanical and morphological properties of wood plastic composites based on municipal plastic waste.

- Polymer Composites* [online]. 2013, **34**(4), 487-493 [cit. 2017-01-12]. DOI: 10.1002/pc.22442. ISSN 02728397. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.22442>
- [32] CUI, Yihua, Stephen LEE, Bahman NORUZIAAN, Moe CHEUNG a Jie TAO. Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2008, **39**(4), 655-661 [cit. 2017-01-12]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.10.017. ISSN 1359835x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X07002370>
- [33] KUO, Pei-Yu, Song-Yung WANG, Jin-Hau CHEN, Huei-Chin HSUEH a Ming-Jer TSAI. Effects of material compositions on the mechanical properties of wood-plastic composites manufactured by injection molding. *Materials & Design* [online]. 2009, **30**(9), 3489-3496 [cit. 2017-01-12]. DOI: 10.1016/j.matdes.2009.03.012. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026130690900106X>
- [34] Dintcheva, N. T. and Mantia, F. P. L. (1999), Recycling of the “light fraction” from municipal post-consumer plastics: effect of adding wood fibers. *Polym. Adv. Technol.*, 10: 607–614. doi:10.1002/(SICI)1099-1581(199910)10:10<607::AID-PAT926>3.0.CO;2-C
- [35] DINTCHEVA, N. Tzankova, F.P. La MANTIA, F. TROTTA, M. P. LUDA, G. CAMINO, M. PACI, L. DI MAIO a D. ACIERNO. Effects of filler type and processing apparatus on the properties of the recycled ? light fraction? from municipal post-consumer plastics. *Polymers for Advanced Technologies* [online]. 2001, **12**(9), 552-560 [cit. 2017-01-22]. DOI: 10.1002/pat.147. ISSN 1042-7147. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pat.147>
- [36] YANG, Te-Hsin, Tsu-Hsien YANG, Wei-Cheng CHAO a Shao-Yuan LEU. Characterization of the property changes of extruded wood-plastic composites during year round subtropical weathering. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, **88**, 159-168 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.019. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815004535i>
- [37] HOMKHIEW, Chatree, Thanate RATANAWILAI a Wiriya THONGRUANG. Effects of natural weathering on the properties of recycled polypropylene composites reinforced with rubberwood flour. *Industrial Crops and Products* [online]. 2014, **56**, 52-59 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.1016/j.indcrop.2014.02.034. ISSN 09266690. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669014001125>

- [38] CATTO, André Luis, Scheyla HERMANN DE ALMEIDA a Ruth Marlene CAMPOMANES SANTANA. Abiotic Degradation of Recycled Polymer/Wood Composites Exposed to Outdoor Application. In: *Journal of Materials Science and Engineering* [online]. 11. 2014, s. 321-329 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.17265/2161-6213/2014.11.001. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/304887088_Abiotic_Degradation_of_Recycled_PolymerWood_Composites_Exposed_to_Outdoor_Applications
- [39] AYRILMIS, Nadir, Alperen KAYMAKCI a Türker GÜLEÇ. Potential use of decayed wood in production of wood plastic composite. *Industrial Crops and Products* [online]. 2015, **74**, 279-284 [cit. 2017-03-19]. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.04.024. ISSN 09266690. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669015300352>
- [40] MIGNEAULT, Sebastien, Ahmed KOUBAA a Patrick PERRÉ. Effect of Fiber Origin, Proportion, and Chemical Composition on the Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composites. *Journal of Wood Chemistry and Technology* [online]. 2014, **34**(4), 241-261 [cit. 2017-03-21]. DOI: 10.1080/02773813.2013.869604. ISSN 0277-3813. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02773813.2013.869604>
- [41] WANG, Zhiling, Enju WANG, Shuxiang ZHANG, Zheng WANG a Yiping REN. Effects of cross-linking on mechanical and physical properties of agricultural residues/recycled thermoplastics composites. *Industrial Crops and Products* [online]. 2009, **29**(1), 133-138 [cit. 2017-03-21]. DOI: 10.1016/j.indcrop.2008.04.016. ISSN 09266690. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669008000836>
- [42] GEORGOPOULOS, S. Th., P.A. TARANTILI, E. AVGERINOS, A.G. ANDREOPOULOS a E.G. KOUKIOS. Thermoplastic polymers reinforced with fibrous agricultural residues. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2005, **90**(2), 303-312 [cit. 2017-04-03]. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.020. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391005002557>
- [43] RIZVI, Ghaus M. a Hamid SEMERALUL. Glass-fiber-reinforced wood/plastic composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology* [online]. 2008, **14**(1), 39-42 [cit. 2017-03-21]. DOI: 10.1002/vnl.20135. ISSN 10835601. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/vnl.20135>
- [44] CUI, Yi-Hua a Jie TAO. Fabrication and mechanical properties of glass fiber-reinforced wood plastic hybrid composites. *Journal of Applied Polymer Science* [online].

- 2009, **112**(3), 1250-1257 [cit. 2017-03-21]. DOI: 10.1002/app.29507. ISSN 00218995.
Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.29507>
- [45] AL-MAADEED, M.A., Yasser M. SHABANA a P. Noorunnisa KHANAM. Processing, characterization and modeling of recycled polypropylene/glass fibre/wood flour composites. *Materials & Design* [online]. 2014, **58**, 374-380 [cit. 2017-03-21]. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.044. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306914001629>
- [46] VÄNTSI, Olli a Timo KÄRKI. Utilization of recycled mineral wool as filler in wood–polypropylene composites. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, **55**, 220-226 [cit. 2017-03-20]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.050. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061814000841>
- [47] HUUHILO, Tiina, Ossi MARTIKKA, Svetlana BUTYLINA a Timo KÄRKI. Mineral fillers for wood–plastic composites. *Wood Material Science & Engineering* [online]. 2010, **5**(1), 34-40 [cit. 2017-03-20]. DOI: 10.1080/17480270903582189. ISSN 1748-0272. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17480270903582189>
- [48] GWON, Jae Gyoung, Sun Young LEE, Sang Jin CHUN, Geum Hyun DOH a Jung Hyeun KIM. Effects of chemical treatments of hybrid fillers on the physical and thermal properties of wood plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010, **41**(10): 1491-1497. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.06.011. ISSN 1359835x.
- [49] NURDINA, A.K., M. MARIATTI a P. SAMAYAMUTTHIRIAN. Effect of single-mineral filler and hybrid-mineral filler additives on the properties of polypropylene composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*. 2009, **15**(1): 20-28. DOI: 10.1002/vnl.20173. ISSN 10835601.
- [50] BUTYLINA, Svetlana, Marko HYVÄRINEN a Timo KÄRKI. Accelerated weathering of wood–polypropylene composites containing minerals. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012, **43**(11): 2087-2094. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.07.003. ISSN 1359835x.
- [51] TURKU, Irina a Timo KÄRKI. The effect of carbon fibers, glass fibers and nanoclay on wood flour-polypropylene composite properties. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2014, **72**(1): 73-79. DOI: 10.1007/s00107-013-0754-8. ISSN 0018-3768.
- [52] DEKA, Biplab K. a Tarun K. MAJI. Effect of silica nanopowder on the properties of wood flour/polymer composite. *Polymer Engineering & Science* [online]. 2012, **52**(7),

- 1516-1523 [cit. 2017-03-21]. DOI: 10.1002/pen.23097. ISSN 00323888. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.23097>
- [53] ESHRAGHI, A., KHADEMIESLAM, H., GHASEMI, I., TALAIEPOOR, M.. Effect of Weathering on the Properties of Hybrid Composite Based on Polyethylene, Woodflour, and Nanoclay. **BioResources**, North America, 8, nov. 2012. Dostupné z: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_08_1_201_Eshraghi_Weathering_Hybrid_Composites
- [54] MIKULENKA, Jan. *Vývoj nových kompozitních materiálů v souvislosti s požární bezpečností staveb*. Ostrava, 2014. 60 s. Diplomová práce. VŠB-TUO, Fakulta bezpečnostního inženýrství.

Seznam obrázků

Obrázek 1 SEM snímky lomové plochy vzorků: a) PP1 (bez kompatibilizéru) a b) PP2 (s kompatibilizérem). [17, s. 80].....	33
Obrázek 2 Povrch vyrobených zkušebních těles – vlevo vstříkovaných, vpravo extrudovaných. [20, s. 80-85]	34
Obrázek 3 SEM snímky povrchu kompozitu s polypropylénovou maticí před (vlevo) a po (vpravo) vystavení exteriérovému prostředí, a) PP0 = 100% PP, b) PP1 = 40% PP / 60% plnivo, c) PP2 = PP1 s 5% kompatibilizéru, d) PP3 = PP2 s obsahem retardéru hoření, e) PP4 = PP3 s obsahem lubrikantu, f) PP5 = PP3 s obsahem biocidní přísady, g) PP6 = PP3 s obsahem lubrikantu i biocidní přísady. [17, s. 85 a 86]	35
Obrázek 4 Norrishovy reakce popisující fotodegradaci matrice dřevoplastového kompozitu [21, s. 2263]	37
Obrázek 5 Porušení integrity povrchu zkušebních těles dřevoplastového kompozitu z vysokohustotního polyetylénu s 50% plněním dřevními vlákny před (vždy vlevo) a po (vždy vpravo) cyklickém ozařování připravené: [22, s. 1887]	38
Obrázek 6 Porušení integrity povrchu zkušebních těles dřevoplastového kompozitu z polypropylénu neplněného (PP) a kompozitů s 10 (PP10) a 30% (PP30) plněním dřevní moučkou: [24, s. 169]	42
Obrázek 7 SEM snímky porušení v tahu kompozitu ze směsi odpadního polyetylénu a polypropylénu bez kompatibilizéru (vlevo) a s kompatibilizérem (vpravo). [31, s. 487-493]	52
Obrázek 8 Změna barevnosti zpracováním u primárního a recyklovaného polymeru a připravených kompozitů s 30 a 60% plněním dřevní moučkou. [28, s. 83]	62
Obrázek 9 SEM snímky povrchu zkušebních těles s 60 (PP40) a 30% (PP70) plněním před vystavením exteriérovým podmínkám (vždy vlevo) a po roční expozici (vždy vpravo). [36, s. 163].....	64
Obrázek 10 SEM snímky povrchu kompozitu před (vlevo) a po 360 dnech (vpravo) vystavení exteriéru: [37, s. 56]	67
Obrázek 12 Zkušební těleso 1B dle ČSN EN ISO 527.....	90
Obrázek 13 Testovací zařízení Testometric M350-20CT s externím tenzometrem.	91
Obrázek 14 Zatěžování ohybem na testovacím zařízení Testometric M350-20CT.....	92
Obrázek 15 Schéma zatěžování ohybem dle ČSN EN ISO 178.	93

Obrázek 16 Snímání infračerveného absorpčního spektra u zkušební tělesa použitým spektroskopem.	94
Obrázek 18 Solarbox 1500. Zdroj: http://kscientific.tradeindia.com/solarbox-weatherometer--754911.html	96
Obrázek 11 Schéma znázorňující náplň jednotlivých etap disertační práce.....	98
Obrázek 19 Jednošnekový extrudér BUSS MDK 46 s dávkovacím zařízením, chladicí vanou a granulovačkou (vlevo), nože granulovačky (vpravo).	106
Obrázek 20 Forma vstřikolisu Arburg s výliskem referenčních zkušebních těles.....	106
Obrázek 21 Zkušební tělesa typu 1B dle ČSN EN ISO 527.	107
Obrázek 22 Zkušební vzorky pro stanovení požární odolnosti.	107
Obrázek 23 SEM snímky lomové plochy zkušebních těles při 200× zvětšení:	112
Obrázek 24 SEM snímky lomové plochy zkušebních těles při 200× zvětšení:	132

Seznam tabulek

Tabulka 1 Produkce dřevoplastového kompozitu v dotčených odvětvích v roce 2012 [26, s. 10].....	45
Tabulka 2 Podmínky cyklického zrychleného testu stárnutí dle ČSN EN ISO 321.....	95
Tabulka 3 Suroviny použité k přípravě receptur zkušebních těles.	105
Tabulka 4 Receptury zkušebních těles s modifikovanou maticí.	105
Tabulka 5 Receptury zkušebních těles s modifikovaným plnivem.	105
Tabulka 6 Receptury pro zkušební tělesa určená ke zkoušení požární odolnosti.....	105
Tabulka 7 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem.	108
Tabulka 8 Vyhodnocení pevnosti v tahu, modulu pružnosti a poměrného prodloužení zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem.	110
Tabulka 9 Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem.	113
Tabulka 10 Spektrální pásy dřevoplastového kompozitu s polypropylenovou maticí.....	114
Tabulka 11 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem vystavených cyklické expozici vlhkosti, mrazu a vysoušení.	115
Tabulka 12 Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem.	116
Tabulka 13 Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem.	120
Tabulka 14 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem vystavených cyklické expozici vlhkosti, mrazu a vysoušení.	123
Tabulka 15 Vyhodnocení tahových charakteristik zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem vystavených UV degradaci.	124
Tabulka 16 Vyhodnocení ohybové pevnosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem vystavených UV degradaci.	126
Tabulka 17 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem.	129
Tabulka 18 Vyhodnocení pevnosti v tahu, modulu pružnosti a poměrného prodloužení zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v matici recyklátem.	130

Tabulka 19 Vyhodnocení pevnosti v ohybu zkušebních těles s příměsí nebo náhradou plniva popílkem.	132
Tabulka 20 Spektrální pásy dřevoplastového kompozitu s polypropylenovou maticí, spektrální pásy popílku	133
Tabulka 21 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s příměsí popílku vystavených cyklické expozici vlhkosti, mrazu a vysoušení.	135
Tabulka 22 Tahové charakteristiky vzorků s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám.	136
Tabulka 23 Ohybová pevnost vzorků s příměsí popílku v postprodukčním stavu a vystaveným 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám.	139
Tabulka 24 Vyhodnocení nasákavosti zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v maticí recyklátem vystavených cyklické expozici vlhkosti, mrazu a vysoušení.	141
Tabulka 25 Vyhodnocení tahových charakteristik zkušebních těles s podílem nebo náhradou primárního polymeru v maticí recyklátem vystavených UV degradaci.	142
Tabulka 26 Vyhodnocení ohybové pevnosti zkušebních těles s příměsí anorganického plniva vystavených UV degradaci.	145
Tabulka 27 Vyhodnocení ohybové pevnosti zkušebních těles s příměsí anorganického plniva vystavených UV degradaci.	147
Tabulka 28 Vyhodnocení ohybové pevnosti zkušebních těles s příměsí anorganického plniva vystavených UV degradaci, upraveno dle [54].	148

Seznam grafů

Graf 1 Nasákavost dřevoplastového kompozitu s polypropylénovou maticí o různém složení surovinové směsi [17, s. 82]	31
Graf 2 Mechanické vlastnosti dřevoplastového kompozitu s polypropylénovou maticí o různém složení surovinové směsi, a) pevnostní charakteristiky, b) modul pružnosti [17, s. 75].....	32
Graf 3 Napětovo-deformační křivky zkušebních těles vstřikovaných s různou délkou vláken (uveden index velikosti plniva L/D) a extruzí. [20, s. 84]	34
Graf 4 Vliv vystavení exteriéru na tahovou pevnost (nahore) a modul pružnosti (dole) dřevoplastového kompozitu s polypropylénovou maticí, hodnoty stanoveny po 2, 4 a 6 měsících. [17, s. 87 a 88]	36
Graf 5 Tahová pevnost zkušebních těles jako funkce času ozařování u vzorků neplněných (PP), s 30% (PP30) a 60% (PP60) plněním. [23, s. 1254].....	39
Graf 6 Karbonylový index zkušebních těles jako funkce času ozařování u vzorků neplněných (PP), s 30% (PP30) a 60% (PP60) plněním. [23, s. 1255].....	40
Graf 7 Tahová pevnost zkušebních těles před expozicí a vystavených přirozeným exteriérovým podmínkám a zrychlenému stárnutí, upraveno dle [24, s. 166].....	41
Graf 8 Počet rozštěpených řetězců v návaznosti na dobu expozice, a) venkovní expozice, b) zrychlené stárnutí [25, s. 275-290]	43
Graf 9 Krystalinita polymerní matrice v návaznosti na dobu expozice: venkovní expozice (nahore) a zrychlené stárnutí (dole) [25, s. 275-290].....	44
Graf 10 Srovnání tahové pevnosti (nahore) a modulu pružnosti v tahu (dole) u vzorků neplněného polymeru (PE nebo směsný recyklát PE+PP), bílá – neplněné polymery, šedá – kompozity. [27, s. 471]	48
Graf 11 Srovnání tahové pevnosti a protažení u vzorků kompozitu připravených z primárního polymeru (virgin resources) a recyklátu (recycled resources) při různém plnění dřevní moučkou. [28, s. 81]	49
Graf 12 Srovnání ohybové pevnosti u vzorků kompozitu připravených z primárního polymeru (virgin resources) a recyklátu (recycled resources) při různém plnění dřevní moučkou. [28, s. 81].....	50
Graf 13 Srovnání tahové pevnosti (nahore) a modulu pružnosti (dole) u neplněné lehké frakce odpadního polymeru (LF) a připravených zkušebních těles z kompozitů o 20 a 40 %hm. plnění při různém dávkování kompatibilizéru (PP/AA nebo PP/MA). [34, s. 611]	53

Graf 14 Protahání (nahore) a rázová houževnatost (dole) testovaných zkušebních těles z neplněného směsného odpadního polyetylenu a polypropylenu a kompozitů při různém plnění dřevními vlákny a míře kompatibilizace při porušení tahem. [34, s. 611-612]	54
Graf 15 Vliv několikanásobné extruze na modul pružnosti v tahu, rázovou houževnatost (nahore) a poměrné prodloužení při porušení a tahovou pevnost (dole). [35, s. 554-555]....	55
Graf 16 Termická analýza vzorků použitých polymerních směsí – nízkohustotního polyetylenu a odpadních směsí polyetylenu a polypropylenu – prostřednictvím DSC a ztráty hmotnosti při zvyšující se teplotě. [27, s. 474]	57
Graf 17 Termická analýza vzorků polymerní směsi odpadního polyetylenu a polypropylenu. [31, s. 488]	57
Graf 18 Tokové křivky směsí z odpadního směsného polyetylenu a polypropylenu neplněného (LF) a kompozitů při různém plnění dřevitou výztuží a míře kompatibilizace. [34, s. 613]	59
Graf 19 Krípkové křivky při 60 °C (nahore) a HDT (dole) zkušebních těles z neplněného směsného odpadního polyetylenu a polypropylenu a kompozitů při různém plnění dřevními vlákny a míře kompatibilizace. [34, s. 613].....	60
Graf 20 Nasákavost vzorků z primárního polymeru (A – neplněný, C – s 30% plněním, E – s 60% plněním) a recyklátu (B – neplněný, D – s 30% plněním, F – s 60% plněním). [28, s. 80]	61
Graf 21 Změna barevnosti u vzorků s 60% (modrá), 50% (zelená), 40% (žlutá) a 30% (červená) plněním dřevní moučkou. [36, s. 162].....	64
Graf 22 Tahová pevnost u vzorků z recyklovaného polypropylenu s 60% (modrá), 50% (zelená), 40% (žlutá) a 30% (červená) plněním dřevní moučkou. [36, s. 165]	66
Graf 23 Pevnost v ohybu u vzorků z primárního polypropylenu (vPP) a recyklovaného polypropylenu (rPP) s 25% (R25) 35,3% (R35) a 45% (R45) plněním dřevní moučkou. [37, s. 57].....	68
Graf 24 Pevnost v tahu (nahore) a index toku taveniny (dole) u vzorků směsi odpadního polypropylenu a polyetylen vinyl acetátu vstavených exteriéru [38, s. 326-327].	69
Graf 25 Tahová a ohybová pevnost vzorků připravených z polypropylenové matrice a dřevní moučky z nepoškozeného dřeva a dřeva poškozeného hnědým tlením při plnění 30, 40 a 50 %, upraveno dle [39, s. 281]	72
Graf 26 Tahová pevnost zkušebních těles z nízkohustotního polyetylenu plněného z 10, 20, 40 a 50 % eukalyptovým dřevem (EU a ET), odpadem z mletí kukuřičných klasů (CCU a CCT)	

a odpadem sladového zrna (SGU a SGT) s různou povrchovou úpravou vláken. [42, s. 307]	74
Graf 27 Napětí při porušení (nahore) a poměrné prodloužení (dole) zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s 5% příměsí skelných vláken. [43, s. 41]	75
Graf 28 Tahová pevnost (nahore) a protažení při porušení (dole) zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s 5, 10 a 15% příměsí skelných vláken o délce S (2 mm) a L (5 mm). [43, s. 1252]	76
Graf 29 Rázová houževnatost zkušebních těles dřevoplastového kompozitu s 5, 10 a 15% příměsí skelných vláken o délce S (2 mm) a L (5 mm). [43, s. 1254]	77
Graf 30 Tahová (nahore) a ohybová (dole) pevnost vzorků připravených z polypropylenové matrice směsného plniva s obsahem dřevní moučky a odpadní minerální vlny v poměrech 64 / 0 (MW0), 44 / 20 (MW20), 34 / 30 (MW30) a 24 / 40 (MW40). Ohybová pevnost byla testována na neporušených (initil measurement) a degradovaných (after cyclic testing) vzorcích. [46, s. 224]	78
Graf 31 Rázová houževnatost (nahore) a tvrdost dle Brinella (dole) vzorků připravených z polypropylenové matrice směsného plniva s obsahem dřevní moučky a odpadní minerální vlny v poměrech 64 / 0 (MW0), 44 / 20 (MW20), 34 / 30 (MW30) a 24 / 40 (MW40). Ohybová pevnost byla testována na neporušených a degradovaných vzorcích. [46, s. 225]	79
Graf 32 Bobtnání (a) nahore) nasákavost (b) dole) vzorků připravených z polypropylenové matrice směsného plniva s obsahem dřevní moučky a odpadní minerální vlny v poměrech 64 / 0 (MW0), 44 / 20 (MW20), 34 / 30 (MW30) a 24 / 40 (MW40). Ohybová pevnost byla testována na neporušených a degradovaných vzorcích. [46, s. 225]	80
Graf 33 Rozměrová stabilita připravených z polypropylenové matrice směsného plniva s obsahem dřevní moučky a různých typů minerálního částicového plniva v poměru 30 / 44 / 20 %: [47, s. 38]	81
Graf 34 Ohybová pevnost (nahore) a tvrdost dle Brinella (dole) vzorků připravených z polypropylenové matrice a směsného plniva s obsahem dřevní moučky a různých typů minerálního částicového plniva v poměru 30 / 44 / 20 %: [47, s. 38]	82
Graf 35 Mechanické charakteristiky vzorků připravených ze směsné matrice s obsahem 40 % dřevní moučky a příměsí nanosiliky 1, 3 a 5 %, upraveno dle [52, s. 1521]	83
Graf 36 Nasákavost vzorků připravených ze směsné matrice s obsahem 40 % dřevní moučky a příměsí nanosiliky 1, 3 a 5 % v závislosti na době ponoření: [52, s. 1522]	84

Graf 37 Nasákavost před a po expozici zrychlenému stárnutí vzorků připravených z matrice z vysokohustotního polyetylenu s obsahem 40 % dřevní moučky a příměsí nanojílů 0, 2 a 4 % [53, s. 201-210].....	84
Graf 38 Nasákavost vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem:.....	109
Graf 39 Pevnost v tahu (nahore) a modul pružnosti (dole) vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem:.....	110
Graf 40 Poměrné prodloužení vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem:	111
Graf 41 Pevnost v ohybu vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem:.....	113
Graf 42 Nasákavost zkušebních těles s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru recyklátem po vystavení 3 a 9 cyklům expozice:	116
Graf 43 Tahová pevnost vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:	117
Graf 44 Modul pružnosti v tahu vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:	118
Graf 45 Poměrné prodloužení vzorků s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:	119
Graf 46 Pevnost v ohybu vzorků s náhradou primárního polymeru nebo podílem recyklátu v matrici v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:	120
Graf 47 Nasákavost zkušebních těles s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:	123
Graf 48 Tahová pevnost zkušebních těles s matricí z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:.....	124
Graf 49 Modul pružnosti v tahu zkušebních těles s matricí z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:.....	125
Graf 50 Tahová pevnost zkušebních těles s matricí z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:.....	126

Graf 51 Ohybová pevnost zkušebních těles s matricí z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:.....	127
Graf 52 Nasákavost vzorků s příměsí nebo náhradou plniva popílkem:.....	129
Graf 53 Pevnost v tahu a modul pružnosti vzorků s příměsí nebo náhradou plniva popílkem:	130
Graf 54 Poměrné prodloužení vzorků s příměsí nebo náhradou plniva popílkem:.....	131
Graf 55 Pevnost v ohybu vzorků s příměsí nebo náhradou plniva popílkem:	133
Graf 56 Nasákavost zkušebních těles s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice:	135
Graf 57 Tahová pevnost vzorků s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:	136
Graf 58 Modul pružnosti v tahu vzorků s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:	137
Graf 59 Poměrné prodloužení vzorků s příměsí popílku po vystavení 3 a 9 cyklům expozice v postprodukčním stavu a vystavené 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:	138
Graf 60 Ohybová pevnost vzorků s příměsí popílku v postprodukčním stavu a vystaveným 3 a 9 cyklům nepříznivým podmínkám:	139
Graf 61 Nasákavost zkušebních těles s příměsí nebo náhradou matrice z primárního polymeru a s podílem recyklátu v matrici vystavených UV záření:	141
Graf 62 Tahová pevnost vzorků s příměsí popílku po UV expozici a v postprodukčním stavu:	142
Graf 63 Tahové charakteristiky vzorků s příměsí popílku po UV expozici a v postprodukčním stavu:.....	143
Graf 64 Tahové charakteristiky vzorků s příměsí popílku po UV expozici a v postprodukčním stavu:.....	144
Graf 65 Ohybová pevnost zkušebních těles s příměsí anorganického plniva vystavených UV záření:.....	145
Graf 66 Pevnostní charakteristiky zkušebních těles bez a s obsahem retardéru hoření v závislosti na podílu popílku v plnivu.	148
Graf 67 Požární charakteristiky zkušebních těles bez a s obsahem retardéru hoření v závislosti na podílu popílku v plnivu, upraveno dle [54].....	149

Seznam spektrogramů

Spektrogram 1 Spektrogram zkušebních těles z polypropylenu neplněných (neat) a kompozitu s 30% plněním (filled) naměřená po 72 a 120 h. Změna intenzity (absorbance) byla hodnocena na vlnočtu 1680 cm^{-1} . [23, s. 1255]	40
Spektrogram 2 Naměřené spektrum směsi odpadního polyetylenu a polypropylenu. [31, s. 488].....	58
Spektrogram 3 Spektrogramy zkušebních těles s 60% plnění: [36, s. 163].....	65
Spektrogram 4 Příklad infračerveného absorpčního spektrogramu označující oblast skupinových vibrací polymerů a oblast otisku palce.	95
Spektrogram 5 Naměřené spektrum zkušebních těles s podílem regranulátu v matrici (nahore) a označení oblasti běžného výskytu spektrálních pásů rozštěpených řetězců:	114
Spektrogram 6 Srovnání spektrogramů referenčních (v postprodukčním stavu) a degradovaných (3 a 9 cyklů):.....	122
Spektrogram 7 Srovnání spektrogramů referenčních (v postprodukčním stavu) a vystavených UV záření (UV expozice):	128
Spektrogram 8 Naměřené spektrum zkušebních těles s podílem regranulátu v matrici (nahore), označení oblasti výskytu produktů Norrishových reakcí (dole):.....	134
Spektrogram 9 Naměřené spektrum zkušebních těles s podílem anorganického částicového plniva - popílku:.....	140
Spektrogram 10 Naměřené spektrum zkušebních těles s podílem anorganického částicového plniva - popílku:.....	146
Spektrogram 11 Naměřené spektrum zkušebních těles po 1000 hodinách ozařování v UV komoře:	150

Použité zkratky

AACA – diallyamin 4,6 dichloro-s-triazin

ABS – akrylonitrilbutadienstyren

AEAPTES – 3,2-aminoetyleminopropyl trietoxysilan

APTES – 3-aminopropyl-3-etoxyasilan

APTMES – 3-aminopropyl-3-metoxysilan trimetoxysilan

ATEAPTMES – 3,2-aminoetyleminopropyl

ATR – Attenuated total reflectance (oslabená totální reflektance)

DSC – diferenční kompenzační kalorimetrie

EBS – etylen-bis-stearamid

FTIR – infračervená spektroskopie s Fouriérovou transformací

GMA – glycidyl metakrylát

HALS – hindered amine light stabilizer (ochranný aminový fotostabilizátor)

HDT – teplota tepelného průhybu (heat deflection temperature)

HDPE – vysokohustotní polyetylén

HEMA – hydroxy metyl metakrylát

IR - infračervený

LDPE – nízkohustotní polyetylén

LLDOE – lineární nízkohustotní polyetylén

LVL – laminated veneer lumber

MAPE – maleated anhydride polyethylene (polyetylen roubovaný anhydridem kyseliny maleinové)

MAA-CAAPE – 3-(4,6-dichloro-s-triazin-2-yl) amino) propyl ester

OACA – 2-oktylamin 4,6-dichloro-s-triazin

OSB – oriented strand board

MDI – metyl difenyl diisokyanát

PE - polyetylén

PHA - polyhydroxyalkanoát

PMMA - polymetylmetakrylát

PP – polypropylén

PP/AA – polypropylen roubovaný akrylátovou kyselinou

PP/MA – maleinanhydridový polypropylen

PVC – polyvinylchlorid

SEM – scanning electron microscope – rastrovací elektronový mikroskop (rastrovací elektronová mikroskopie)

UV – ultrafialový

XRF – rentgenová fluorescenční spektroskopie

Značky a jednotky

kg/h – kilogram za hodinu

min - minuta

mg – miligram

mm/min – milimetr za minutu

MPa – megapascal

ot/min – otáčky za minutu