

Využití polymerních materiálů v moderních prostředcích hromadné dopravy

Bc. Jana Přikrylová

Diplomová práce
2019

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů
akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jana Přikrylová**
Osobní číslo: **T17852**
Studijní program: **N2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Využití polymerních materiálů v moderních prostředcích hromadné dopravy**

Zásady pro vypracování:

Cílem práce je:

- 1) příprava literárního shrnutí aktuálního stavu poznání v oblasti hromadné dopravy se specifickým zaměřením na nové legislativní požadavky v oblasti bezpečnosti pasažérů
- 2) laboratorní příprava modifikovaných polymerních materiálů spojená s jejich odpovídající charakterizací
- 3) návrh technologických postupů a zpracovatelských podmínek pro účely přípravy dílů využívaných v prostředcích hromadné dopravy s ohledem na aktuální požadavky bezpečnosti při přepravě a otestování užitečných vlastností těchto dílů

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Tim A. Osswald, Georg Menges, Materials science of polymers for engineers, Munich: Hanser Publishers; Cincinnati: Hanser Garden Publications, 2003**
2. **Novel fire retardant polymers and composite materials, De-Yi Wang, ISBN9780081009772**

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce:

2. ledna 2019

Termín odevzdání diplomové práce:

14. května 2019

Ve Zlíně dne 18. února 2019

L.S.

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno:¹ PŘIKRYLOVÁ JANA

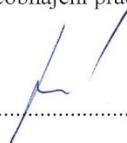
Obor:⁰ INŽENÝRSTVÍ POLYMERŮ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně^{14.5.2019}

.....


¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlázení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce se zabývá polymerními materiály a možnostmi výrobních procesů, které nacházejí uplatnění v dopravním hromadném průmyslu s odkazem na aktuální požadavky hořlavosti materiálů.

V praktické části byly následně připraveny vzorky směsí na bázi polypropylenové, polykarbonátové a polyuretanové matrice s použitím retardérů hoření. Byly charakterizovány mechanické vlastnosti a hořlavost připravených vzorků směsí za účelem zkoumání vlivu plnění retardéry hoření na tyto vlastnosti.

Klíčová slova: polymerní materiály, kompozity, hromadná doprava, retardér hoření, hořlavost

ABSTRACT

The theoretical part of diploma thesis is focused on polymer materials and possibilities of manufacturing processes, which find applications in public transport industry with reference to current requirements of material flammability.

In the practical part mixtures based on polypropylene, polycarbonate and polyurethane matrix with fire retardants were prepared. The mechanical properties and flammability of the samples these mixtures were characterized, while the effect of the fire retardants filling on the properties was examined.

Keywords: polymer materials, composites public transport, fire retardant, flammability

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce doc.Ing.Tomáši Sedláčkovi, Ph.D. za cenné zkušenosti, trpělivost, osobitý přístup a odborné vedení, které mi bylo přínosné pro vypracování diplomové práce.

Další velké díky patří všem, kteří mi byli nápomocní při vypracování praktické části diplomové práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST.....	10
1 POLYMERNÍ MATERIÁLY V DOPRAVĚ.....	11
1.1 TYPY POUŽÍVANÝCH MATERIÁLŮ V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH.....	12
1.1.1 Kompozitní materiály.....	12
1.1.2 Plasty.....	16
1.2 NEJČASTĚJI POUŽÍVANÉ VÝROBNÍ POSTUPY PRODUKTŮ VYUŽÍVANÝCH V PROSTŘEDCÍCH HROMADNÉ DOPRAVY.....	18
1.2.1 Kompozitní produkty vyrobené RTM technologií.....	18
1.2.2 Pultruzní kompozitní produkty.....	19
1.2.3 Vstřikování.....	21
1.2.4 Tvarování za tepla – thermoforming.....	22
1.3 APLIKACE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ V AUTOBUSOVÉ A MĚSTSKÉ HROMADNÉ DOPRAVĚ.....	24
1.3.1 Nehořlavost materiálů použitých v prostředcích hromadné silniční dopravy.....	27
1.4 APLIKACE POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ V DRÁŽNÍ DOPRAVĚ.....	28
1.4.1 Nehořlavost materiálů použitých v prostředcích železniční dopravy.....	29
2 ÚPRAVA POLYMERNÍCH MATERIÁLU POMOCÍ RETARDÉRŮ HOŘENÍ.....	31
2.1 RETARDÉRY HOŘENÍ.....	31
2.2 PRINCIPY RETARDACE HOŘENÍ.....	31
2.3 DĚLENÍ RETARDÉRŮ HOŘENÍ.....	31
2.3.1 Retardéry na bázi halogenů.....	32
2.3.2 Bezhalogenové retardéry hoření.....	32
2.3.2.1 Minerální retardéry hoření.....	32
2.3.2.2 Retardéry hoření na bázi zinku.....	33
2.3.2.3 Retardéry hoření na bázi fosforu.....	33
2.3.2.4 Retardéry hoření na bázi dusíku.....	34
2.3.3 Další retardéry hoření.....	34
2.3.3.1 Retardéry hoření na bázi křemíku.....	34
2.3.3.2 Nanoplňiva jako retardéry hoření.....	34
2.3.3.3 Intumescentní systémy jako retardéry hoření.....	35
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	36
3 CÍL PRÁCE.....	37
4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH SMĚSÍ.....	38

4.1	POUŽITÉ POLYMERNÍ MATERIÁLY.....	38
4.2	POUŽITÉ RETARDÉRY HOŘENÍ.....	38
4.3	PŘÍPRAVA POLYMERNÍCH VZORKŮ	38
4.4	TERMOPLASTICKÉ ZPRACOVÁNÍ	39
4.4.1	Kompaundace.....	39
4.4.1.1	Míchání polymerní směsi s polypropylenovou maticí	39
4.4.1.2	Míchání polymerní směsi s polyuretanovou maticí.....	40
4.4.2	Lisování.....	41
4.4.2.1	Lisování polypropylenových vzorků	41
4.4.2.2	Lisování polyuretanových vzorků	41
4.4.3	Vstřikování zkušebních vzorků s polykarbonátem	41
5	CHARAKTERIZACE RETARDÉRŮ HOŘENÍ.....	43
5.1	METODIKA RASTROVACÍHO (SKENOVACÍHO) ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU (SEM) A ELEKTRONOVÉHO DISPERZNÍHO SPEKTROMETRU (EDX)	43
5.2	VÝSLEDKY ANALÝZY SEM A EDX.....	44
6	CHARAKTERIZACE PŘIPRAVENÝCH VZORKŮ	48
6.1	MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	48
6.1.1	Metodika stanovení tahových vlastností	48
6.1.2	Výsledky tahové zkoušky	50
6.1.3	Metodika stanovení rázové a vrubové houževnatosti pomocí metody Charpy	59
6.1.4	Výsledky rázové a vrubové houževnatosti.....	60
6.2	HOŘLAVOST	63
6.2.1	Metodika testování hořlavosti na kónickém kalorimetru.....	63
6.2.2	Výsledky zkoušky hořlavosti	64
	ZÁVĚR	75
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	77
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	85
	SEZNAM TABULEK.....	88
	SEZNAM PŘÍLOH.....	89

ÚVOD

Požadavky v dopravním průmyslu se v poslední době výrazně pozměnily. Konstrukční i designové materiály musí často splnit nadstandartní kritéria: cenová dostupnost, nízká hmotnost, nenáročnost výroby, vysoká míra recyklovatelnosti a aktuálním tématem jsou vycházející standardy a předpisy v oblasti zvyšujících se nároků na nehořlavost materiálů. Jelikož hořlavost materiálů může být z hlediska bezpečnosti pasažérů významným limitem pro použití polymerů, nastává v poslední době velký zájem o zakomponování retardérů hoření, které mají za cíl snížit zmínění bezpečnostní riziko.

V železniční dopravě se vývoj zaměřuje směrem ke zvýšení času nutného pro evakuaci pasažérů v případě vzniku požáru. Důkazem toho je vydání evropské normy EN 45545, která se cíleně zaměřuje na evaluaci hořlavosti materiálů, které jsou aplikovány v drážních prostředcích.

Trend snížení hořlavosti použitých materiálů se objevuje i v případě kolových dopravních hromadných prostředků, kdy je definován v rámci předpisu R118.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERNÍ MATERIÁLY V DOPRAVĚ

Všechny druhy dopravy vyžadují pro svůj chod palivo, a to představuje podstatnou část provozních nákladů. Snížení hmotnosti automobilů, autobusů, lodí a vlaků může dramaticky snížit spotřebu paliva. Nízká hustota plastů je v tomto pohledu činí nezastupitelnými materiály pro využití v dopravním průmyslu. [1–6]

Polymerní materiály jsou odolné, nevykazují korozi a nevyžadují příliš náročnou údržbu. Navíc dostupné technologie jejich zpracování umožňují nejen svobodu designu, ale i rychlou a ekonomicky výhodnou produkci. Plastové díly, jako jsou palubní desky, podlahy, sedadla či masky si udržují spotřebitelsky atraktivní vzhled po dlouhou dobu. V nynější době se dá říci, že k základním požadavkům kladeným na polymerní materiály rozhodně patří možnost customizace, bezpečnost, spolehlivost a aktuálně nehořlavost. [2,4,6–7]

Největší množství aplikací polymerních materiálů se vyskytuje patrně v automobilovém průmyslu. Plastové komponenty dávají předpoklad naplnění požadavků na ekonomickou výhodnost, bezpečnost, pohodlí a minimalizaci dopadu na životní prostředí. [1–7]

Plastové materiály zaujímají velké pole působnosti i v silniční hromadné a nákladní dopravě. Aplikace plastových dílů v silničních prostředcích snižuje zejména hmotnost vozidel, což přináší nižší finanční náklady na pohonné hmoty. [1–7]

Aerodynamické požadavky na polymerní materiály výrobků pro letecký průmysl vyžadují maximální flexibilitu na konstrukční požadavky (pevnost, tvrdost, odolnost) s minimální hmotností dílů. U polymerů v letectví se hojně využívá kompozitů, které se aplikují v kapotážích i v interiérových dílech. [1–7]

Polymerní materiály používané v železničních lokomotivách, vozech a jiných kolejových vozidlech musí odolávat opotřebení a velkým dynamickým zátěžím. Životnost polymerních materiálů je jedním z faktorů, které je činí první volbou pro panely motorů, vozů, podlah, držáků zavazadel, sedadel nebo dveří. [1–7]

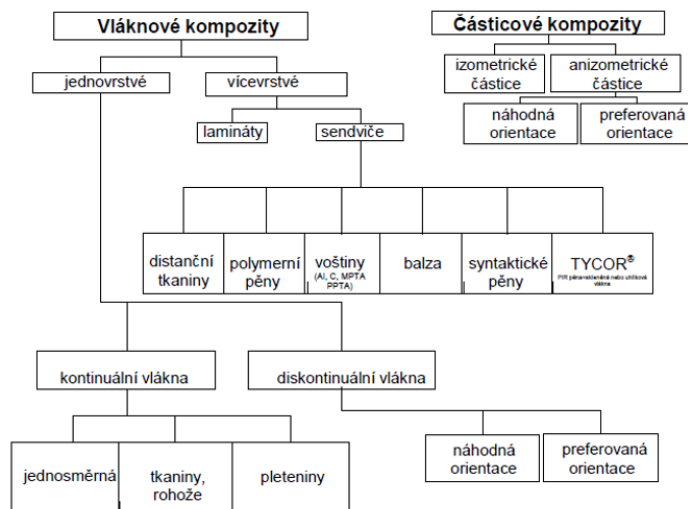
Některé typy plastových výrobků mají schopnost odolávat drsnému mořskému prostředí, a proto jsou klíčovou volbou pro všechny typy námořních plavidel, od oceánských parníků až po plachetnice. Tyto plasty vykazují minimální známky koroze a vyžadují výrazně méně údržby než jiné tradiční používané materiály. [1–7]

1.1 Typy používaných materiálů v dopravních prostředcích

V prostředcích silniční i kolejové dopravy se s výhodou využívají pultruzní vlákna a tkaninami vyztužené kompozitní profily využívané v interiérových i exteriérových aplikacích. V interiérových aplikacích se dále s výhodou objevují výrobky z plastů, jako je například akrylonitrilbutadienstyren (ABS), směsi akrylonitrilbutadienstyren/polykarbonát (ABS/PC) nebo polypropylenu (PP). [1–9]

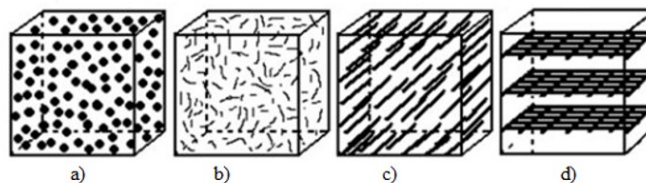
1.1.1 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více odlišných fází, které se od sebe různí v mechanických, fyzikálních či chemických vlastnostech. Spojitá fáze zastává funkci pojiva a je nazývána maticí. Další fáze, obvykle tužší, tvrdší a nespojitá v 3D prostoru, je nazývána výztuží. Významným úkolem výztuže je modifikace vlastností polymerní matrice. Proto mechanické vlastnosti výztuže, jako je tvrdost, pevnost, modul pružnosti, jsou výrazně vyšší ve srovnání s maticí. [1–2]



Obrázek 1 Rozdělení kompozitních materiálů [3]

Základní rozdělení kompozitních materiálů lze dělit podle tvaru výztužných prvků na částicové nebo vláknové. Velikost tvarově nepravidelných částic u částicových kompozitních systémů se pohybuje v rozmezí 1 až 20 μm . Částice u vláknových kompozitů se klasifikují podle délky, na dlouhé a krátké. Pevnost a odolnost jednotlivých kompozitních materiálů je dána druhem a uspořádáním výztuže. [4–5]



Obrázek 2 Rozdělení kompozitů podle geometrického tvaru výztuže a) částicový, b) s krátkými vlákny, c) s dlouhými vlákny s tkaninou v jednom směru, d) s dlouhými vlákny s tkaninou ve více směrech [6]

Nejčastějším materiálovým typem výztuže jsou skleněná vlákna. Stavební jednotkou je oxid křemičitý SiO_2 s příměsí oxidů hliníku (Al), vápníku (Ca), bóru (B), sodíku (Na), draslíku (K), hořčíku (Mg) a dalších. Podle obsahu příměsí oxidů se skleněná vlákna dále rozlišují. Nejčastější aplikací skleněných vláken je E-sklo pro svou nízkou elektrickou vodivost nebo S-sklo s dominantní vysokou pevností. Struktura skleněných vláken je amorfni a je tvořena tetraedry, které jsou k sobě vázány kovalentně s centrálně umístěným atomem křemíku. Jedná se o materiál s nízkou cenou, nízkou hmotností, s odolností proti chemikáliím a dobrou ohebností při zachování pevnosti. Skleněná vlákna se připravují při dloužení roztaveného skla, které dosahují průměru vlákna od 3 do 20 μm . Během dloužení se na vlákna nanáší lubrikace, která zajišťuje vytvoření dostatečně pevné adheze k použité matici. Aplikace skleněných vláken se využívá i při modifikaci nehořlavosti materiálu, což se uplatňuje například při výrobě pultruzních profilů. [7–10].

Používaným typem výztuže jsou také uhlíková vlákna, která se vyrábějí karbonizací, grafitizací a oxidací polyvinylchloridových, viskózních nebo akrylonitrilových vláken díky tendenci k jejich snadné karbonizaci. Obsahují krystalickou strukturu, ve které se uplatňují kovalentní vazby. Obvykle uhlíková vlákna dosahují průměru mezi 5–10 μm . Tyto vlákna vynikají vysokou pevností, tuhostí, elektrickou vodivostí. Podobně, jako u skleněných vláken, je více druhů, které se od sebe liší především mechanickými vlastnostmi. [28–29]

Aramidová vlákna, vyrobená z aromatických polyamidů, v kompozitních materiálech jsou vyhledávána pro svou vysokou tuhost, pevnost, schopnost absorpce energie a žáruvzdornost. Aramidová vlákna disponují nejnižší hustotou v porovnání s přechodnými zmíněnými vlákny. K nevýhodám patří nízká tlaková pevnost, anizotropie vláken a hydrofilita.

Často nacházejí použití v aplikacích, kde je požadavek zatížení lehkých konstrukcí tahem. [28–29]

Přírodní materiály jsou další skupinou, které se dají využít pro výztuže kompozitů. Přírodní organická vlákna mohou být rostlinného i živočišného původu. Uplatnění nachází především sisal, konopí, juta, bavlna, len, vlna či hedvábí. Nejlepší vlastnosti vykazují konopná vlákna pro svou pevnost, lehkost a malé prodloužení při přetržení. Vlákna z juty jsou nejlevnější možností, avšak mají vysokou hydrofilitu a působením UV křehnou. Vlákna ze sisalu jsou hrubá a neohebná, ale vykazují přijatelnou pevnost a odolnost vůči slané vodě. Vlákna ze lnu jsou lesklá, pevná, tuhá a odolná. Bavlněná vlákna jsou velice hydrofilní a při přetržení dosahují prodloužení až 8 %. [28–29]

Tabulka 1 Vybrané vlastnosti výztužných vláken

<i>Materiál vláken</i>	<i>Hustota ρ [g/cm³]</i>	<i>Tahový modul E_t [GPa]</i>	<i>Tahová pevnost σ_t [GPa]</i>	<i>Max. teplota použití T [°C]</i>
<i>S-sklo</i>	2,48	85	4,8	300
<i>E-sklo</i>	2,6	72	3,5	1,18
<i>Uhlík (HM-vysokomodulový)</i>	1,96	517	1,86	600
<i>Uhlík (HS-vysokopevnostní)</i>	1,8	295	5,6	500
<i>Kevlar 29</i>	1,44	60	2,7	-
<i>Kevlar 49</i>	1,45	130	2,7	160
<i>Sisal</i>	1,45	9,4-22	0,47-0,70	-
<i>Len</i>	1,5	27,6	0,35-1,50	-
<i>Juta</i>	1,3-1,5	13,-26,50	0,39-0,80	-
<i>Konopí</i>	1,47	70	0,69	-
<i>Bavlna</i>	1,5-1,6	5,5-12,6	0,29-0,80	-

K vytvoření kompozitního materiálu je nutná matrice, která je klíčová pro vytvoření a zafixování tvaru kompozitu, zajištění ochrany vláken a zajištění přenosu namáhání na výztuž. Matrice, která plní úlohu pojiva, musí pro účely zajištění dokonalého smáčení výztuže a žádoucí kompatibility disponovat odpovídajícím povrchovým napětím a viskozitou. S ohledem na tento požadavek jsou s výhodou modifikované povrchové vlastnosti vláken. Pro

kompozity vyztuženými vlákny jsou využívány jak reaktoplastické, tak i termoplastické matrice. Při vytvrzování reaktoplastických pryskyřic dochází k uvolnění tepla v důsledku exotermické reakce.

Nejčastěji se používají tyto pryskyřice:

- Epoxidová (EP)
- Polyesterová (UP)
- Vinylesterová (VE)
- Fenolická (PR)
- Polyuretanové (PU)

Velmi používanou maticí pro kompozitní materiály je epoxidová pryskyřice. Je charakteristická výskytem epoxidové skupiny v molekule. Díky výskytu epoxidového kruhu patří mezi reaktivní látky. Během vytvrzování nedochází k žádnému odštěpení vedlejšího produktu a polymerační smrštění bývá pouze okolo 2 %. Je univerzální z hlediska kompatibility pro všechny typy vláken, poskytuje dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti. EP vynikají dobrou odolností vůči vodě, roztokům zásad, některým kyselinám a některým druhům organických rozpouštědel. [28–31]

Nenasycené polyesterové pryskyřice nacházejí uplatnění především v konstrukčních kompozitních aplikacích. Vyskytují se ve formě roztoku lineárních nenasycených polyesterů a reaktivní dvojnou vazbou mezi uhlíky. Polymeračním roztokem bývá reaktivní styren, který během vytvrzování spojuje krátké oligomerní řetězce. Iniciace radikálové reakce probíhá pomocí volných peroxidových radikálů, které vznikají během štěpení peroxidů. Vytvrzování probíhá při teplotě, která je dána použitým iniciátorem.

Využívané termoplasty jako matrice v kompozitních materiálech jsou:

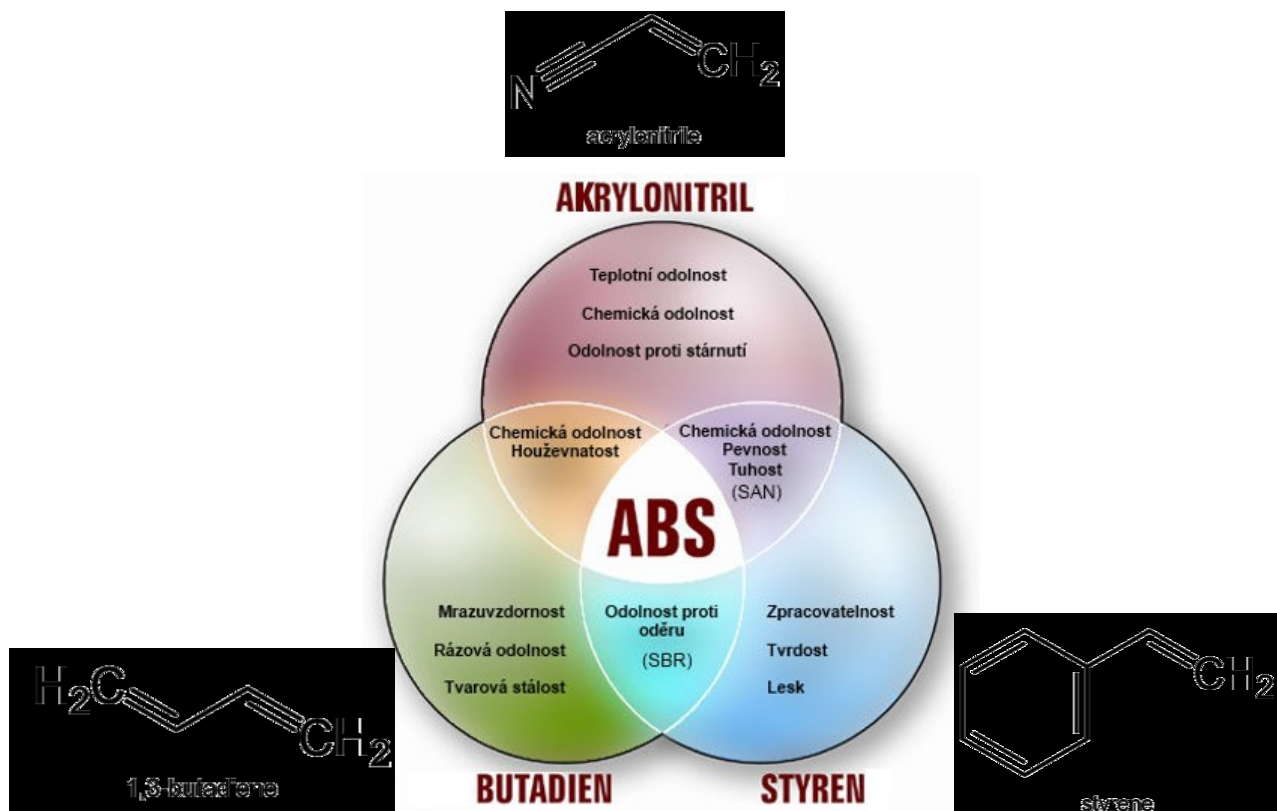
- Polypropylen (PP) a polyetylen (PE)
- Polyfenylsulfid (PPS)
- Polyéteréterketon (PEEK)
- Polyéterketonketon (PEKK)

Při použití termoplastické polymerní matrice je z důvodu absence vytvrzovacího procesního kroku dosaženo ve srovnání s reaktoplastickými maticemi vyšší produktivity výrobního cyklu. K dalším výhodám patří skladovatelnost surovin za normální teploty nebo houževnatost těchto materiálů. K nevýhodám zmiňovaných materiálů patří sklony k tvoření

krípu, vyšší teploty při tváření, vysoká viskozita či nižší tvrdost. Termoplastický materiál většinou vstupuje do výrobního procesu ve formě tenké fólie. [28–29, 34]

1.1.2 Plasty

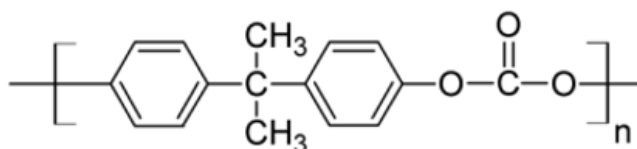
Mezi nejčastěji používaný amorfni termoplastický kopolymer patří ABS. Kopolymer je tvořen třemi složkami, které ovlivňují vlastnosti polymeru. Styren dodává polymeru dobrou zpracovatelnost, butadien zajišťuje houževnatost a odolnost proti nárazu a akrylonitril zvyšuje chemickou a tepelnou odolnost. Pevnost, tuhost, tvrdost, odolnosti proti krípu a teple u ABS roste se stoupajícím obsahem styren-akrylonitrilu. Houževnatost a tažnost roste s klesajícím obsahem butadienu. Polymerní materiály ABS se zpracovávají při různých teplotách a tepelné vlastnosti polymeru charakterizuje teplota skleného přechodu, která se pohybuje v rozmezí 88–128°C. ABS je pro svou schopnost přizpůsobení se rozdílným požadavkům, jako je tepelná odolnost, elektrická izolace, pevnost v tahu, rozměrová stálost, dostatečná tvrdost, často využíván v dopravním průmyslu. ABS se nejčastěji zpracovává vstřikováním a extruzí. Pro aplikace interiérových dílů v hromadných dopravních prostředcích se využívá vakuového tvarování. Pro ovlivnění hořlavosti materiálu je potřeba jeho modifikace 5–30 % koncentrací retardérů hoření. [15]



Obrázek 3 Vliv jednotlivých složek ABS na vlastnosti, strukturní vzorec akrylonitrilu, 1, 3-butadienu, styrenu [16]

Pro náročné požadavky na nehořlavost materiálu při zachování zpracovatelských a mechanických vlastností ABS se v interiérových aplikacích v dopravních prostředcích používá směs ABS/PC. Polykarbonátová složka ve směsi s ABS má za následek nutnost předsušení materiálu, protože polykarbonát je vysoce hydrofobní. Kombinace ABS a PC využívá dobré zpracovatelnosti, kterou propůjčuje směsi ABS s výbornými mechanickými vlastnostmi, kterými vyniká PC. Směs disponuje tepelnou odolností, vysokou tuhostí a nízkým smrštěním. [15–16, 37–39]

Polykarbonát patří do skupiny amorfních průhledných termoplastů. PC se řadí k polyesterům. Vyniká výbornou pevností, dobrou tepelnou odolností, rázovou houževnatostí, odolností proti povětrnostním vlivům a dobrými elektrickými vlastnostmi. Teplota skelného přechodu se pohybuje okolo 150 °C, teplota viskózního toku je přibližně 240 °C a Youngův modul pružnosti je v rozmezí od 2–2,4 GPa. PC je standardně tvarově stabilní do teplot 140 °C, případně do teplot 200 °C u vysokoteplotních typů. [43–44]



Obrázek 4 Strukturní vzorec polykarbonátu [44]

Polykarbonát nachází uplatnění především jako konstrukční prvek. Dále je vhodný pro aplikaci krytů a plášťů pro elektrické zařízení. Využívá se pro výrobu světel v automobilovém průmyslu. Nejznámější aplikací PC jsou kompaktní disky. [44]

Polypropylen je termoplastický polyolefin, který patří k běžně dostupným plastům. Expanzním důvodem využití polypropyleny je jeho snadná dostupnost, nízké počáteční pořizovací náklady a nenáročnost při zpracovávání. Polypropylen je semikrystalický polymer s vysokým stupněm krystalinity (60–75 %), která způsobuje jeho neprůhlednost. Při zvyšující se krystalinitě roste tuhost, pevnost a ohybové napětí materiálu a klesá rázová houževnatost. Vykazuje dobré elektroizolační vlastnosti vlivem nepolární struktury. Disponuje

odolností vůči chemikáliím a nepříliš vysokou pevností. Bez přídavku stabilizátorů a aditiv podléhá UV záření, což se projevuje zkrěhnutím materiálu. [17]



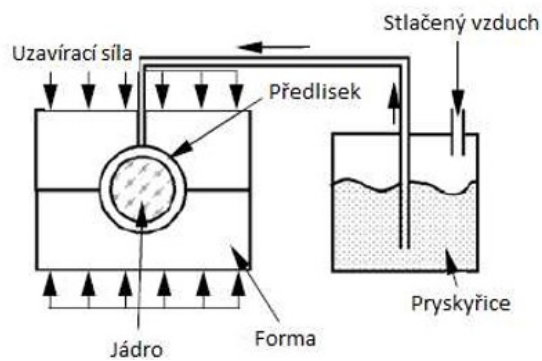
Obrázek 5 Strukturální vzorec PP [17]

Teplota tání izotaktického PP je 160–165 °C, teplota skleného přechodu bývá v rozptěti -20 až 20 °C, modul pružnosti se pohybuje v rozmezí 1100–1800 MPa, molekulová hmotnost se pohybuje v hranicích od 60 000–600 000 g.mol⁻¹ a stupeň krystalinity je 60–70 %. Zatímco výhodou při zpracování je nízká teplota tání, nevýhodou je vysoká smršťitelnost související s vysokým stupněm krystalinity. [17]

1.2 Nejčastěji používané výrobní postupy produktů využívaných v prostředcích hromadné dopravy

1.2.1 Kompozitní produkty vyrobené RTM technologií

K výrobě oboustranně pohledových dílů se nejčastěji používá technologie výroby RTM (z angl. Resin Transfer Molding). Technologie je vhodná pro středně až velkosériovou výrobu pro tvarově složitých a přesných výrobků. Materiálem formy je s ohledem na množství plánované produkce nejčastěji hliník nebo kompozitní systém. Technologie RTM probíhá vložením suchých vláken preformu do vstřikovací formy. Preform (předlisek) může být obohacen o pěnové jádro nebo kovová žebra. Následně je vložen do formy ošetřené separačním přípravkem. Kvalitní separace povrchu formy je klíčová pro kvalitní povrch finálního výrobku. Po uzavření formy dochází přes vstupní otvory ke vstřikování tvrditelné pryskyřice. Následuje proces vytvrzení a vyjmutí hotového výrobku z formy. [18–19]



Obrázek 6 Schéma RTM procesu [35]

K výhodám RTM technologie patří nízké počáteční investice do výroby forem oproti lisování nebo vstřikování, nízké rozměrové tolerance, možnost produkce oboustranně pohledových výrobků, možnost využití různých druhů výztuží, a to až do objemu 65 objemových % a konečně s ohledem na uzavřenou formu i nízké množství těkavých látek uvolňujících se do okolí. RTM technologie se používá pro výrobky v hromadných prostředcích, jako jsou nárazníky, boční lemy nebo kryty strojových elementů (obr. 7).



Obrázek 7 Zadní kompozitní kryt světel

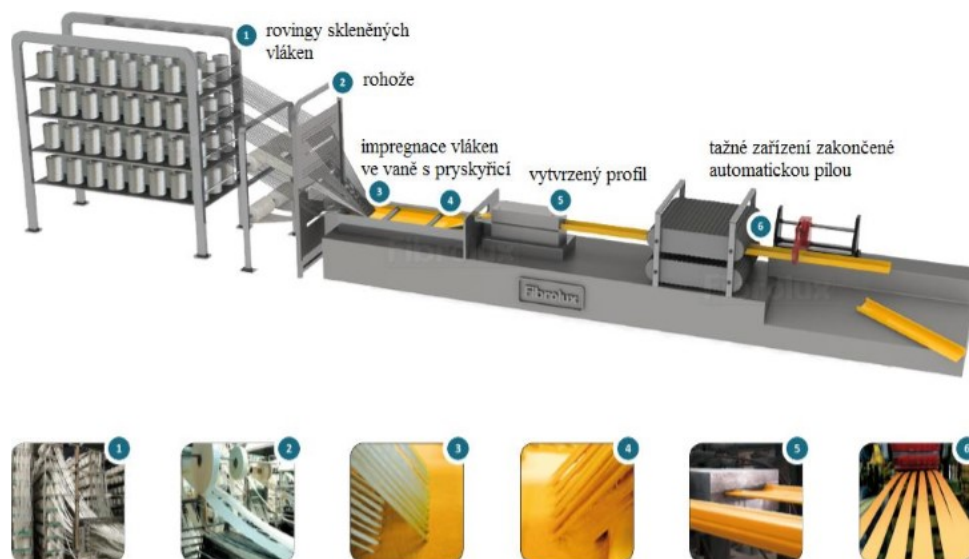
1.2.2 Pultruzní kompozitní produkty

Výroba pultruzních profilů je kontinuální proces tažení vyztužených pryskyřic různých tvarů a délek. Vstupním materiálem je směs tekuté pryskyřice a vláknové výztuže. Nepostradatelnými částmi pultruzní linky jsou: zásobník výztuží, impregnační vana se směsí pryskyřice a ostatních aditiv, proces předtvarování impregnované výztuže, vytvrzovací forma, tažné, dělicí a odsávací zařízení (viz obr. 8). [8, 11, 31–33]

Zásobník s výztužemi obsahuje stojany pro vlákna a držáky k zachycení tkaninových rohoží. Vlákna jsou navinutá na cívkách, následně vstupují do srovnávacího zařízení, které rozmístí rovnoměrně roving a správně umístí tkaninové rohože. V impregnační vaně dochází

k nánosu směsí pryskyřice, plniva, barviva, katalyzátoru a dalších důležitých přísad na vlákna a rohože s cílem zajistit dosažení požadovaných materiálových vlastností kompozitu. Po výstupu z lázně následuje nanesení roušky. Její úlohou je vytvoření kvalitního povrchu vytvrzovaného kompozitu a zvýšení odolnosti UV záření. Po procesu máčení v lázni postupuje polotovar do předtvarovací formy pro vytlačení přebytečného pojiva, následně dochází k tvarování profilu a vstupu do vytvrzovací formy, kde dochází k vytvrzování a zajištění fixace tvaru. Po vytažení profilu pomocí tažného zařízení následuje dělicí sekce, která připravený profil řeže na požadovanou délku. Během procesu pultruze kompozitů se uvolňují těkavé látky. [10–11, 29–31, 33]

Nejčastěji se používá polyesterová pryskyřice pro své nízké cenové náklady. Díky nízké viskozitě dochází k dobrému smáčení vláken a rychlému vytvrzení. Nevýhodou může být smrštění, které činí 5–9 %. Pryskyřice se vyrábí reakcí dikarbonových kyselin s glykoly. Výběrem kyseliny se mohou upravit vlastnosti jako je houževnatost, chemická odolnost nebo tepelná odolnost. K vytvrzování dochází při teplotě od 25 do 175 °C či za působení UV záření v závislosti na použitém iniciátoru. [4, 8–9, 12–14, 31–32]



Obrázek 8 Výrobní linka pultruzních profilů [30]

Výztuže v pultruzních profilech mohou dosahovat až 80 hm. procent. K jejich přednostem patří nízká hmotnost, nízká tepelná vodivost, vysoká korozní odolnost, vysoká rozměrová stálost a elektrická nevodivost. [8, 30–31]

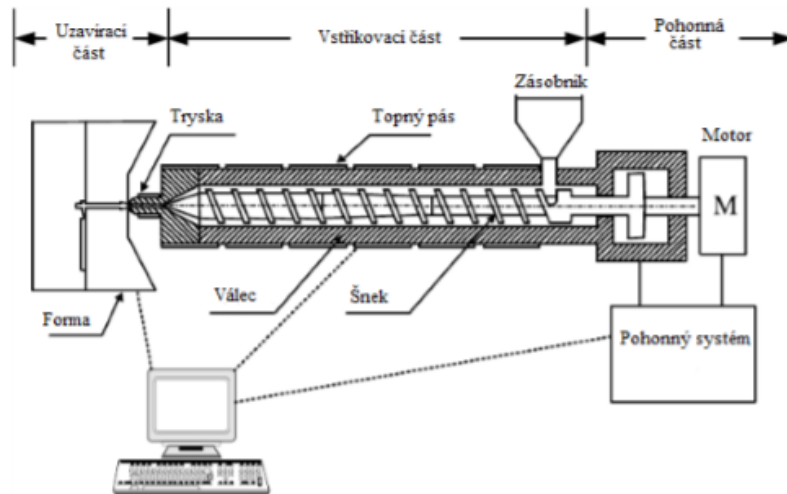


Obrázek 9 Pultruzní profily jako zavazadlové koše v autobusech

1.2.3 Vstřikování

Technologie vstřikování zaujímá ve výrobním plastikářském průmyslu významné místo z pohledu nejrozšířenější technologie. Díky možnosti kontroly dílčích parametrů vstřikovacího procesu je zajištěna možnost výroby dílů o velké tvarové členitosti a vysoké rozměrové přesnosti s kvalitním povrchem. Z důvodu vysokých počátečních investic do strojů a nástrojů se technologie vstřikování preferuje pro velkoobjemové sériové produkce. Vstupními materiály jsou nejčastěji termoplasty, nicméně nejsou ojedinělé ani reaktoplasty nebo elastomery. [40–42]

Technologie vstřikování začíná v plastikační jednotce, která je opatřena pístem nebo šnekem. V této jednotce dochází k plastikaci a homogenizaci materiálu. Polymerní materiál se za působení tepla z topných pásů a disipace mechanické energie zahřívá a přechází do taveniny. Šnek vykonává při rotaci zajišťující dopředný posun materiálu i zpětný pohyb, aby se tavenina dostala do čela šneku. Další fází je plnění, kdy posunem šneku vpřed dochází po uzavření formy za působení vstřikovacího tlaku naplnění dutiny formy. Následuje fáze dotlaku, která je klíčová z hlediska užitných vlastností vstřikovaného výrobku, jelikož při ní dochází k nahrazení ztráty materiálu vyvolané smrštěním z důvodu poklesu teploty a krystalizace. Dotlakem se tak efektivně regulují a eliminují propadliny a lunkry (vakuoly). Souběžně s chladicí fází probíhá plastikace materiálu pro další vstřikovací cyklus. [40–42]

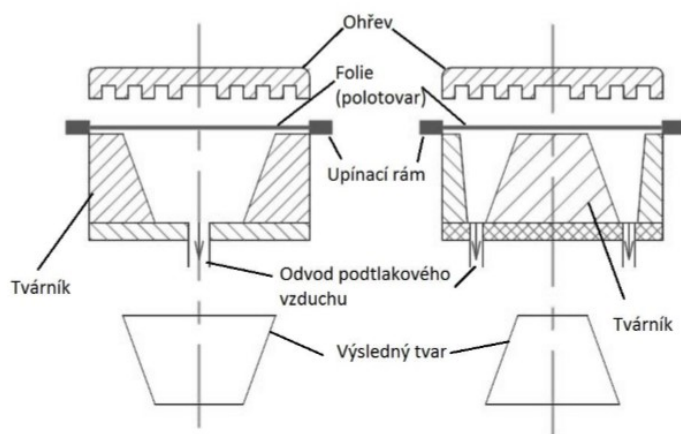


Obrázek 10 Schéma vstřikovacího stroje [40]

1.2.4 Tvarování za tepla – thermoforming

Při výrobním procesu tvarování dochází k upnutí polotovaru (nejčastěji desky) do rámu lisu. Následuje ohřev materiálu na teplotu tvarování daného termoplastického materiálu pomocí konvenčního tepla z topných těles. Polotovar je poté umístěn do tvarovací formy, kde za působení vnější mechanické síly nebo podtlaku dochází k tvarování a lisování do požadovaného tvaru. Tvarovací lisy lze tedy rozdělit na mechanické, hydraulické nebo pneumatické. Oblíbené jsou kombinace, např. pneumaticko-mechanické. Při výrobním procesu se thermoforming rozlišuje na pozitivní nebo negativní tvarování. K přednostem dané technologie patří nízké počáteční náklady na zhotovení formy a vysoká produktivita při využívání vícenásobných forem. [36]

Teplota tvarování se liší typem termoplastického materiálu, u amorfních termoplastů se nachází mezi teplotou skelného přechodu T_g a teplotou viskózního toku T_f , u krystalických polymerních materiálů se nastavuje teplota v oblasti teploty tání T_m . [36]



Obrázek 11 Pozitivní a negativní tvarování [36]



Obrázek 12 Přístrojová deska z ABS v kabině řidiče

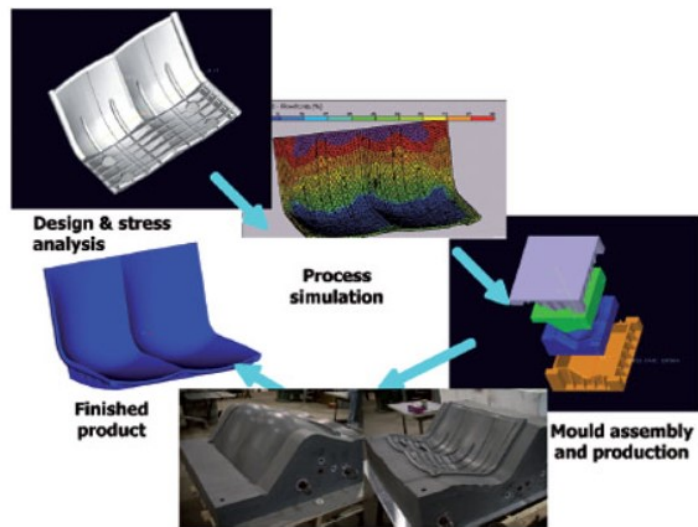


Obrázek 13 Boční kryt z ABS/PC podél čelního skla v prostoru dveří v autobusu

1.3 Aplikace polymerních materiálů v autobusové a městské hromadné dopravě

Snížení hmotnosti a nákladů v hromadných tranzitních autobusech a kolejových vozidel má přímý vliv na spotřebu paliva, nižšího opotřebení vozovky, méně náročné údržby a zvýšené životnosti. Pozornost aplikací polymerních materiálů se zaměřuje ke snížení hlučnosti a vznikajících vibrací. V oblasti autobusové a městské hromadné dopravy zaujímají polymerní materiály komplexní nabídku plastikářských výrobků vyrobené různými technologiemi. V interiéru i exteriéru se můžeme setkat s plastovými díly v podobě přední masky, blatníků, krytů světel a mnoho dalších. Jedná se o plastové výrobky od jednotlivých dílů až po kompletní řešení interiérového prostoru řidiče (obr. 12–13). [36, 59]

V oblasti technologie výroby kompozitních materiálů je mnoho aplikací, které našly uplatnění v silniční hromadné dopravě a přinesly výhody. K aplikacím kompozitních materiálů v autobusové dopravě se řadí kryty klimatizací, venkovní kryty, zadní kryty světel, pultruzní držáky zavazadel a mnoho dalších. U komponent, jako jsou dvoumístné autobusové sedadlo, boční panel karoserie a segment konstrukčního rámu, střešní panely pro klimatizaci, které nahrazují podobné komponenty v konvenčních ocelových autobusech používaných v městské hromadné dopravě, bylo dokázáno, že při použití kompozitů nahrazujících tradiční materiály, jako je ocel nebo hliník, je dosaženo úspory hmotnosti materiálu přibližně 40 % a předpokládané snížení nákladů na životní cyklus přibližně 45–50 %. [33, 59]



Obrázek 14 Ukázka modelace sedadla do autobusu z polypropylenu vyztuženého skleněnými vlákny [59]

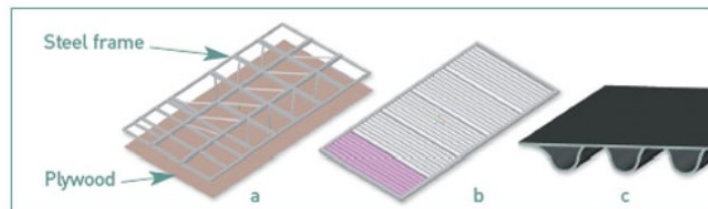
Důkazem snížení hmotnosti je dvoumístné autobusové sedadlo vyrobené z polypropylenu plněného E-sklem vážící pouze 10 kg při porovnání stávajícího modelu s konstrukcí z oceli, která se využívá ve většině městských hromadných prostředků, vážící 21 kg (viz obr. 14). Pozitivním bonusem nahrazením termoplastickým materiálem je eliminace montážních bodů oproti kovové konstrukci. Termoplastické sedadlo bylo vyrobeno extruzí polypropylenu s dlouhými (12–50 mm) skleněnými vlákny. Polypropylen může dále sloužit nejen pro výrobu sedadel ale i podlah nebo jako kryty dvířek boxu baterie (obr. 15). [59]



Obrázek 15 Aplikace skleněné vlákna/PP [59]

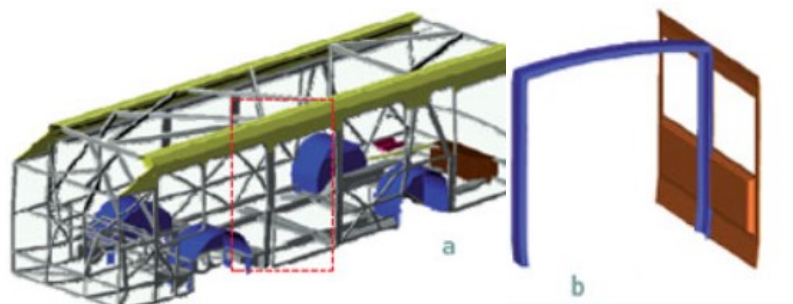
Dalším příkladem nahrazením ocelové konstrukce termoplastickým materiálem jsou aplikace podlahovin v hromadných prostředcích (obr. 16). Konvenční podlaha je vyrobena z oceli a překližky. Během životnosti hromadného prostředku musí být podlaha několikrát vyměňována, protože ocel koroduje a překližky ztrácí životnost v důsledku působení kyselých mycích prostředků a přítomné vlhkosti. Obrázek 16 znázorňuje porovnání konvenční

podlahy s polymerní podlahovou částí, která je vyrobena z polypropylenu plněným sklem. Nahrazením dřívější konstrukce z oceli a překližek má pozitivní dopad na snížení vibrací a zvuku. [59]



Obrázek 16 Inovace podlah v interiéru autobusu a) ocelová konstrukce s překližkou, b) panel z PP vyztužený skleněnými vlákny, c) tvarový detail podlahového panelu [59]

Postranní panel karoserie také prošel inovací a nahrazením ocelovým rámem polymerním materiálem. Na obrázku 17 je vyobrazen nově vyvinutý konstrukční rám vyrobený z polyfenylsulfidu plněným uhlíkovým vláknem, který se používá v kombinaci s bočním panelem karoserie z termoplastického polypropylenu plněným sklem. [59]



Obrázek 17 Konvenční autobusová konstrukce s ocelovými rámy, b) montáž konstrukčního rámu na panely karoserie [59]

Efektivní a ekonomické řešení různých krytů nebo držáků nabízejí kompozitní materiály zpracovávané pultruzí. Pultruzní profily v exteriéru těla autobusu mohou tvořit podélné boční nebo rohové střešní kryty. V interiéru slouží jako kryty klimatizace nebo držáky zavazadel. Jedná se o aplikaci pultruzního kompozitního materiálu z polyesterové pryskyřice, která je vyztužená skleněnými vlákny (obr. 18). Pro snížení hmotnosti, ale při zachování požadované odolnosti, se uvažuje o aplikacích celé konstrukce střechy autobusů. [20–21]



Obrázek 18 Ukázka podpůrné konstrukce pultruzních profilů v interiéru autobusů

Pro konstrukce podlah se s oblibou využívá kompozitních panelů z polyuretanové matrice vyztužené skleněnou tkaninou s komerčním názvem puxit (obr. 19), které nahradily přírodní laminát skládající se z tenkých vrstev dřeva (překližka). Tento kompozitní sendvičový materiál výrazně snižuje hmotnost při zachování důležitých mechanických vlastností, vodězdornosti, tepelně-izolačních vlastností, odhlučnění a splnění požadavku nehořlavosti pro aplikace podlah v tramvajích, autobusech ale i vlacích. [59]



Obrázek 19 Kompozitní materiál používaný pro aplikace podlah v autobusech

1.3.1 Nehořlavost materiálů použitých v prostředcích hromadné silniční dopravy

Požadavky týkající se nehořlavosti materiálu jsou specifikovány i pro prostředky hromadné silniční dopravy, které jsou definovány v evropském předpise č. 118 Evropské hospodářské komise a Organizace spojených národů (EHK/OSN). Předpis platí pro vlastnosti materiálů, které se používají pro vnitřní konstrukce určitých kategorií motorových vozidel při hoření. Požární zátěž vozidla musí být co nejmenší, obzvláště pro výrobky v interiéru

jako je obložení, sedačky, podlahy, izolace, osvětlení. Předpis definuje i požadavky pro kabeláž, která musí být zhotovena z takových materiálů, které jsou obtížně zápalné, samozhášivé produkující minimální množství dýmu a neobsahující halogeny. Při požáru tyto materiály nemají vytvářet žádné anebo pouze minimálně slabě toxické plyny. Předpis zakazuje použití materiálu obsahující polyvinylchlorid (PVC). Pro nová vozidla platí tento předpis od 07/2017, pro vyrobená vozidla před tímto datem je platnost uvedeného předpisu od 07/2020. Předpis definuje tři zkoušky testování hořlavosti materiálu. Stanovuje se rychlost hoření materiálu ve vodorovném a vertikálním směru dle aplikace v interiéru a definují se vlastnosti materiálu při tavení. [64]

Výrobci polymerních materiálů se ubírají dvěma směry. Jednak sledují možnosti retardace polymerních materiálů anebo zakomponování nehořlavých polymerních materiálů do polymerní matrice. Typickým aktuálním příkladem jsou směsi ABS/PC, které jsou vhodné pro vakuové tvarování či vstřikování interiérových dílů do hromadných prostředků. [64]

1.4 Aplikace polymerních materiálů v drážní dopravě

V kolejové dopravě se díky stálosti mechanických vlastností, odolnosti proti únavě, jednoduché údržbě a aktuální požární odolnosti používají sendvičové kompozitní konstrukce. Důkazem jsou například střešní panely u tramvaje nebo vnější krycí panely u vlaků. [22–24]



Obrázek 20 Obrázek 21 Příklady kolejových vozidel s kompozitními panely

Nejčastějším důvodem aplikace polymerních kompozitů je snížení hmotnosti, kdy lze dosáhnout až 55% snížení váhy u dveřních panelů za použití sendvičových kompozitních dílců s termoplastickou voštinou při porovnání s aplikací panelů z hliníkových potahů a ocelové výztuže. [25–27, 59]

Pro aplikaci interiérových i exteriérových obložení stěn se používají lehké kompozitové sendvičové panely. Přesná skladba těchto panelů je hlídaným výrobním know-how, panely však často obsahují stejný polymerní materiál, který se využívá pro podlahoviny, například polyuretanová pryskyřice obohacená o retardéry hoření vyztužená skleněnou tkaninou. [22, 25–27]

V drážní dopravě se pro aplikace interiérových krytů stěn a stropů, exteriérových bočních a střešních krytů taktéž používají pultruzní profily. Najdeme je i v konstrukci rámu podlah, kde nahrazují hliníkové i ocelové nosníky. Porovnání s kovovými aplikacemi mají kompozitní materiály lepší izolačně tepelné vlastnosti a nepodléhají korozi. [22, 25–27]

1.4.1 Nehořlavost materiálů použitých v prostředcích železniční dopravy

Vývoj polymerních materiálů v železniční dopravě se zaměřuje do oblasti snížení hořlavosti materiálů. Snížením hořlavosti je myšleno oddálení iniciace požáru, zpomalení jeho růstu a následného šíření. Od roku 2013 vstoupila v platnost společná evropská norma EN 45545 předepisující soubor zkušebních metod a přesných požadavků pro různé kategorie aplikací s různými hladinami nebezpečí (HL1, HL2, HL3, kde je HL3 největší), které jsou klasifikovány dle typu a použití materiálu v drážním vozidle. Konkrétní protipožární požadavky na vlastnosti materiálů a výrobků používaných v drážní dopravě se nacházejí v EN 45545-2. Definovány jsou pro každou úroveň nebezpečí zkušební metody, zkušební podmínky a specifikace materiálu či výrobku. [62–63]

Každý díl v kolejovém vozidle je klasifikován dle umístění, dle tvaru a specifickém uspořádání (vertikální, horizontální), následně je dále roztrženo do podskupin dle umístění (interiér nebo exteriér) a dle využití (nábytek, mechanické zařízení, elektrotechnické zařízení). Touto klasifikací musí projít všechny výrobky, př. závěsy, stropní panely, složky podlah, skelety podhledů atd. [62–63]

Příklady metod testování, které nařizuje norma EN 45455:

- Dle normy EN ISO 4589-2 se testují materiály na stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla, kdy výsledkem je procentuální hodnota obsahu kyslíku.
- Norma ISO 5658-2 popisuje test na šíření plamene do stran. Stanuje se hodnota CFE, která je zkratkou pro kritický tok při hašení.

- Zkouška reakce na oheň se řídí dle normy ISO 5660-1 a stanovuje hodnoty uvolňování tepla, tvorbu kouře a úbytek hmotnosti. Metoda se provádí na kónickém kalorimetru při tepelném toku 50 kWm^{-2} a byla vybrána pro praktickou část diplomové práce. Výsledkem je hodnota Marhe.
- Dle normy EN ISO 5659-2 se provádí stanovení optické hustoty v jednoduché komoře. Stanovují se hodnoty D_s (optická hustota) či VOF_4 (kumulativní hodnota optických hustot). [62–63]

Jednou z možných aplikačních oblastí pro termoplasty ve vlakových interiérech je zadní opěradlo vlakových sedadel, které spadá pod kategorii R6. R6 je požadavek dle normy EN 45545, která definuje maximální hodnotu Marhe v HL1 90 kWm^{-2} , v HL2 90 kWm^{-2} a v HL3 hodnotu 60 kWm^{-2} , kterou jsou limitovány materiály. V současné době se nejčastěji používají směsi ABS/PC nebo PP. Bohužel tyto materiály často nesplňují náročné požadavky daného standardu EN 45545. V poslední době velké firmy zabývající se vývojem materiálů obohatily své nabídky o materiály splňující požadavky standardu EN 45545. Mezi jinými je možné zmínit materiály bázi ABS/PC – Vispec FRPC98 (Vitasheet Group), kopolymeru PC – Bayblend FR411 MT (Covestro), Lexan 915R (Sabic), či PP (Metzeler 2R6). [62–63]

V souladu s tímto trendem byly za účelem naplnění požadavků nově platných legislativních požadavků se současným zachováním vysoké efektivity zpracování do podoby rozměrově velkých a složitých dílů v rámci diplomové práce modifikován PP. Dosažená úroveň snížené hořlavosti byla společně s testováním mechanických zkoušek porovnána s komerčně dostupným systémem na bázi PC. S ohledem na fakt, že se v drážní dopravě vyskytují i aplikace polyuretanových sedadel, byla dále v praktické části navržena, modifikována a testována i polyuretanová směs. [62–63]

2 ÚPRAVA POLYMERNÍCH MATERIÁLU POMOCÍ RETARDÉRŮ HOŘENÍ

2.1 Retardéry hoření

Retardérem hoření je myšlena taková látka, které zpomaluje nebo zabraňuje hoření. Cílem daného aditiva je snížení hořlavosti. Snížování hořlavosti u polymerních materiálů bylo zajištěno dříve nejpoužívanější skupinou bromovaných retardérů hoření. Do této kategorie spadají polybromované difenyletery a bifenyly nebo hexabromocyklodekany. Aplikace těchto přísad je zakázána z důvodu perzistence v prostředí. Zvýšení odolnosti proti hoření je možné zajistit použitím nejen bromovaných látek, ale i retardérů na bázi křemíku, bóru, zinku, anorganických plniv anebo nanočástic. Jedná se sice o méně škodlivé a toxické látky, avšak s klesající toxicitou obecně klesá i efektivita a účinnost aditiva. [60–61]

2.2 Principy retardace hoření

Retardace polymerních materiálů může proběhnout dvěma mechanismy, fyzikálním nebo chemickým. Ani kombinace obou mechanismů nebývá neobvyklým mechanismem účinku retardérů. [60–61]

Přídavek retardérů hoření do polymerních systémů může způsobit následující účinky retardace. Přídavek inertního retardéru hoření do organického materiálu vede ke zvýšení tepelné kapacity a snížení uvolňování kouře a zplodin. Zpomalovače hoření mohou vytvářet ochranné bariéry, které zamezují přístupu kyslíku anebo plní funkci izolace během procesu hoření. Může docházet k eliminaci vzniku hořlavých látek v důsledku použití retardéru hoření nebo blokace mechanismu hoření. [60–61]

2.3 Dělení retardérů hoření

Retardéry hoření lze dělit podle chemické struktury na halogenové a bezhalogenové. V dnešní době je trendem opustit od halogenových aditiv z důvodu své toxicity. K vyhledávaným možnostem zlepšování odolnosti hořlavosti materiálů se do popředí dostávají bezhalogenové retardéry. Ty se mohou dělit na anorganické, na bázi fosforu, dusíku a další. [45]

2.3.1 Retardéry na bázi halogenů

Účinnost halogenových retardérů se odvíjí od použitého typu halogenu. Fluorované a jodované sloučeniny se nevyužívají z důvodu neschopnosti zasažení do procesu hoření. U fluorovaných halogenů je důvodem vysoká teplotní stabilita, vyšší než teplota rozkladu polymeru, u jodovaných naopak dochází k uvolnění halogenové části příliš brzy, často u teploty zpracování polymeru. Využití nacházejí bróm a chlór, kteří disponují nízkou vazebnou energií s uhlíkem. To jim napomáhá k snadnějšímu uvolnění a pomocí radikálového mechanismu se účastnit procesu hoření. Principem přerušení hoření je zaměnění volného vodíku a vodíkového radikálu za halidový, který blokuje hoření. Retardéry na bázi halogenů při procesu hoření disociují a štěpí halogenový radikál, který reaguje s polyolefinem. Výsledkem jsou hydrogen-halidy, které se následně štěpí na hydroxylové a vodíkové radikály omezující proces hoření. [46–48]

2.3.2 Bezhalogenové retardéry hoření

Bezhalogenové jsou v porovnání s halogenovými méně účinné, což se kompenzuje ve větším dávkovaném množství. Avšak disponují nižší hustotou kouře, nižší toxicitou a korozivitou spalin. [48–49]

2.3.2.1 Minerální retardéry hoření

Všechny minerální plniva nepřímo ovlivňují reakce polymerního materiálu při hoření. Z důvodu pozitivních výsledků při chování některých minerálních plniv při vysokých teplotách jsou využívány jako retardéry hydroxidy hliníku nebo hořčíku, hydroxykarbonáty nebo borát zinku. Velkou výhodou je, že minerální retardéry mají samozhášivý účinek. Se zvyšováním teploty dochází k endotermickému rozkladu plniv za současného uvolňování nehořlavých látek (voda a oxid uhličitý). Taktéž tvoří na povrchu keramickou nebo sklovitou bariéru. [46]

Velice využívanými retardéry hoření na bázi minerálních látek jsou hydroxid hořečnatý a hydroxid hlinitý pro úpravu snížení hořlavosti polyolefinů (PP, PE). Velkou výhodou je cenová dostupnost, naopak výraznou nevýhodou je množství plnění. U těchto retardérů dochází až k 60hm% plnění, což výrazně ovlivňuje mechanické a reologické vlastnosti a

výslednou cenu výrobku. Většinou dochází k aplikaci dalších přísad, které vylepší zpracovatelnost. Významnou komplikací je i nízká teplotní stabilita, k rozkladu dochází při podobných teplotních limitech, jako jsou teploty pro zpracování polyolefinů. [47, 56]

2.3.2.2 Retardéry hoření na bázi zinku

Důležitou skupinou retardérů hoření na bázi zinku, jsou nejčastěji boritany. Nejvíce je využíván $2 \text{ ZnO} \cdot 3 \text{ B}_2\text{O}_3 \cdot 3,5 \text{ H}_2\text{O}$, známý pod obchodním názvem Fire brake. Boritan zinečnatý reaguje primárně v kondenzované fázi a dochází k tepelnému rozkladu. Během této fáze se uvolňuje voda, kyselina boritá a oxidy bóru. V systémech obsahující halogen se využívá v kombinaci s oxidem antimonným nebo trihydrátem oxidu hlinitého. Výsledkem je katalyzace za tvorby popela a ochranné vrstvy povrchu materiálu. V bezhalogenových materiálech se používá v kombinaci s hydroxidem hořečnatým nebo polyfosfátem amonným. Výsledkem je opět tvorba boritanové izolační vrstvy. [57]

2.3.2.3 Retardéry hoření na bázi fosforu

Retardéry na bázi fosforu jsou účinné především v kondenzované fázi, protože dochází ke vzniku kyseliny fosforečné a příbuzných kyselin, které během endotermické reakce při hoření začnou figurovat jako chladiče. Na povrchu vzorku vytvářejí sklovitou bariéru, který eliminuje vývoj hořlavých plynů a zamezuje průniku kyslíku. Zároveň blokují oxidaci volných radikálů uhlíků, které se slučují v oxid uhličitý. [45–47, 56]

K příkladům používaných retardérů hoření na bázi fosforu patří amonium polyfosfát, melamin polyfosfát nebo estery kyseliny fosforečné. K hlavním benefitům použití zmíněných retardérů je nízké plnění, které bývá nejčastěji okolo 20hm.%. S menším plněním nedochází k výraznému ovlivnění fyzikálních a mechanických vlastností polymerního materiálu. K nevýhodám patří vyšší náklady na zařízení, citlivost na vlhkost a vyšší teploty (okolo 200 °C a vyšší). [45]

Taktéž drahou možností je použití tzv. červeného fosforu. Jedná se o fosfor v anorganické formě. Jeho účinnost se podpoří v materiálech, které obsahují kyslík a dusík. Plnění postačí do 10hm.%. Vyniká teplotní stabilitou do 320 °C. Velkou nevýhodou je, že výsledný materiál získá tmavé zbarvení. [45]

2.3.2.4 Retardéry hoření na bázi dusíku

Retardéry na bázi dusíku lze aplikovat pro termoplastické i reaktoplastické polymerní materiály. K výhodám použití retardérů hoření na bázi dusíku patří účinnost při malých koncentracích, UV a tepelná stabilita. [45–46]

V praxi jsou dostupné polyfosforečnan amonný, soli melaninu nebo aloxyaminy. Melanin je tvořen 67 hm% dusíku. Jedná se o krystalický prášek, který vyniká teplotní stabilitou až do 345 °C, což je definovaná teplota tání. Sublimace nastává při 350 °C se sorpcí množství energie, která způsobí pokles teploty. Při teplotním rozkladu dochází ke štěpení amoniaku. [45–46]

2.3.3 Další retardéry hoření

Vývoj použitelných retardérů hoření se zaměřuje i na sloučeniny na bázi křemíku nebo na nanomateriály na bázi uhlíku. [45–48]

2.3.3.1 Retardéry hoření na bázi křemíku

K výhodám retardérů hoření na bázi křemíku patří vytvoření povrchové bariérové vrstvy, tvořené oxidem křemičitým, která snižuje rychlost uvolňování tepla. Podstatný vliv na efektivitu retardéru v systému má typ polymerního řetězce. Osvědčily se rozvětvené silikonové polymery. Plnění systémů s takovými retardéry postačí nízké. K dalším výhodám patří nízké množství unikajících toxických plynů během procesu hoření. Používají se silikony, silikáty nebo organosilany. [45–47]

2.3.3.2 Nanoplňiva jako retardéry hoření

Velký význam hraje dispergace a distribuce nanočástic. V segmentu využití nanočástic jsou nejčastěji testovány přírodní vrstevnaté silikáty, které patří do skupiny nanojílů. Nanočástice zapříčiňují tvorbu popela, který migruje k povrchu spalovaného materiálu. Opět dochází k tvorbě bariéry, která blokuje únik hořlavých plynů. Využívají se mimo jiné i nanočástice oxidů kovů. [45–46]

2.3.3.3 Intumescentní systémy jako retardéry hoření

Intumescentní systémy reagují již v počáteční fázi hoření. Na povrchu vzorku dochází ke kombinaci uhelnatění s napěňováním. Povrch je tvořen zpěněnou zuhelnatělou vrstvou, která funguje jako ochranná bariéra před působením tepla. Intumescenty obsahují zdroj kyseliny, který dehydratuje činidlo, karbonizující činidlo a expanzní nadouvadlo. [45–46, 56]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je příprava polymerních směsí, do které je zakomponovaný retardér hoření pro potencionální aplikace v železniční hromadné dopravě, které jsou limitovány v oblasti hořlavosti normou EN 45545.

V závěru práce bude shrnuto dosažených výsledků s odkazem na nejvhodnější namíchanou směs, která se nejvíce blíží parametrům definovaným normou EN 45 545. Hlavní pozornost při vyhodnocování výsledků je zaměřena na evaluaci hodnoty MARHE (maximum average rate of heat emission) charakterizována pomocí kónického kalorimetru a zhodnocení mechanických vlastností jednotlivých směsí.

4 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH SMĚSÍ

4.1 Použité polymerní materiály

Pro návrh polymerní směsi, bylo zvoleno několik druhů polymerních materiálů a zpomalovačů hoření. Pro konstrukční interiérové díly byl vybrán polypropylen, zatímco materiál pro přípravu sedadel byl reprezentován polyuretanem. Pro srovnání s komerčně dostupným konstrukčním materiálem byla vybrána už připravená směs kopolymerů polykarbonátů s retardéry hoření.

Prvním polymerním materiálem pro návrh směsi byl použit polypropylen HE125MO (Borealis) a polypropylen C123-01N (Braskem). Granuláty polypropylenů byly smíchány v poměru 1:1 z důvodu modifikace mechanických a zpracovatelských vlastností.

Základními surovinami pro přípravu polyuretanů byl polyol Bayflex 89-173 (Covestro) a difenylmetan-4,4'-diizokyanát Desmodur VP.PU 78IF07 (Covestro). Reakčním mechanismem je polyadice. Dle materiálového listu byl určen dávkovací poměr polyol/izokyanát 1:1,21 dílů.

Z komerčně dostupných kopolymerů speciálních polykarbonátů byly vybrány dva zástupci-Bayblend TP 2139 (Covestro) a Bayblend FR411 MT (Covestro). Kvůli přehlednějšímu porovnání výsledků byl vybrán ještě PC Makrolon (Covestro), jako standard bez přídavku retardéru hoření.

4.2 Použité retardéry hoření

Pro aplikace polypropylenů byl zvolen retardér hoření dále označený B3 v kombinaci s E7 a F5. B3 díky svému vysokému obsahu oxidu fosforečného a dusíku se stejně jako E7 na bázi fosforečnanu amonného v polymerním systému chová jako intumescent. F5 je dehydratovaný boritan zinečnatý se samozhášecími účinky. Pro polyuretanovou směs byl zvolen intumescentní retardér hoření E4 na bázi polyfosfátu amonného.

4.3 Příprava polymerních vzorků

V následujících tabulkách je shrnutí složení polymerních směsí – polymer s typem retardéru hoření. Zastoupení jednotlivých složek, které byly použity ve směsi, je uvedeno v hmotnostních procentech.

Tabulka 2 Složení směsi s polypropylenovou polymerní matricí

	<i>PP0</i>	<i>PP1</i>	<i>PP2</i>	<i>PP3</i>	<i>PP4</i>	<i>PP5</i>	<i>PP6</i>
<i>PP [%]</i>	100	75	70	70	65	65	65
<i>B3 + E7 [%]</i>	-	25	30	25	35	25	30
<i>F5 [%]</i>	-	-	-	5	-	10	5

Pozn. Vzorčky směsí byly navrženy s doporučeným množstvím retardérů hoření, které bylo uvedeno v materiálové dokumentaci. Zmíněné množství se pohybovalo od 25–30 % hmotnostního obsahu.

Tabulka 3 Složení směsi s polyuretanovou polymerní matricí

	<i>PUR0</i>	<i>PUR1</i>	<i>PUR2</i>	<i>PUR3</i>	<i>PUR4</i>	<i>PUR5</i>	<i>PUR6</i>
<i>Polyol a izokyanát [%]</i>	100	90	80	80	70	70	70
<i>E4 [%]</i>	-	10	20	10	30	20	10
<i>F5 [%]</i>	-	-	-	10	-	10	20

Pozn. Vzorčky směsí byly navrženy s doporučeným množstvím retardérů hoření, které bylo uvedeno v materiálové dokumentaci. Zmíněné množství se pohybovalo od 10–30 % hmotnostního obsahu.

4.4 Termoplastické zpracování

4.4.1 Kompaundace

Pomocí procesu kompaundace byly přidány retardéry hoření do vstupní suroviny za účelem zvýšení odolnosti proti hoření.

4.4.1.1 Míchání polymerní směsi s polypropylenovou matricí

Uvedené vzorky směsí v tabulce 2 byly připraveny na laboratorním hnětacím zařízení značky Brabender. Topné pásma na daném hnětači byla nastavena na teplotu 200 °C a míchání směsí bylo prováděno do ustálení kroutícího momentu (cca 6 minut) při otáčkách 100–110 ot. /min.



Obrázek 22 Laboratorní hnětič Brabender

4.4.1.2 Míchání polymerní směsi s polyuretanovou maticí

V tabulce 3 je uvedeno procentuální složení jednotlivých polyuretanových směsí s různým stupněm plnění retardéry hoření. Polyolová složka, komerčního označení Bayflex 89-173, byla temperována na 25 °C. Izokyanátová složka, s komerčním označením Desmodur VP.PU 78IF07, byla ponechána při laboratorní teplotě 22°C. Z důvodu velice rychlé reakce polymerizace daných komponent, byl zvolen následující postup. Dle hmotnostního zastoupení byla navážena polyolová složka. Následně byla přidána navážka retardéru hoření. Polyolová složka s retardérem byla poté za použití vakuové míchačky smíchána. Míchání probíhalo při 150 ot. / min po dobu 2 min. V posledním kroku byl vmíchán izokyanát.



Obrázek 23 Obrázek 24 Vakuová míchačka s příslušenstvím

4.4.2 Lisování

4.4.2.1 Lisování polypropylenových vzorků

Připravené vzorky s polypropylenovou maticí byly lisovány na mechanickém lise s topnými deskami do požadovaných destiček, které měly definované rozměry pro následné testovací metody. Pro hořlavostní zkoušky byly lisovány vzorky s rozměry 100x100x4 mm, pro mechanické zkoušky byly vylisovány vzorky s rozměry 125x125x2 mm. Teplota topných desek byla nastavena na 200°C. Doba lisování trvala 5–10 minut dle tloušťky vzorku. Po vylisování byly vzorky chlazeny v mechanickém lise s chladicími deskami při teplotě cca 10°C.



Obrázek 25 Mechanický lis s topnými deskami

4.4.2.2 Lisování polyuretanových vzorků

Lisování polyuretanových vzorků probíhalo ihned po vmíchání polyolové složky s retardéry hoření do izokyanátu z důvodu velmi rychlých polymerních reakcí. Lisování probíhalo za použití mechanických lisů s nastavenou teplotu na 70 °C a lisovací doba byla stanovena na 20 minut. Následně byly vzorky sušeny v sušící peci při 80 °C po dobu jedné hodiny. Zkušební vzorky polyuretanů byly připraveny s rozměry 100x100x6 mm pro použití na zkoušky hořlavosti pomocí kónického kalorimetru.

4.4.3 Vstřikování zkušebních vzorků s polykarbonátem

Vzorky s polykarbonátem byly připraveny na vstřikovacím stroji značky Mitsubishi 180 MET3. Všechny 3 materiály s polykarbonátovou maticí byly nejdříve vysušeny v sušící

peci po dobu 8 hodin při teplotě 90 °C podle materiálového listu. Podmínky vstřikovacího procesu byly pro každý materiál jiné a jsou uvedeny v následující tabulce (viz tab. 4).

Tabulka 4 Technologické parametry vstřikovacího stroje

Technologické podmínky	PC Makrolon	Bayblend FR411 MT	Bayblend TP 2139
Vstřikovací rychlost [mm/s]	50	40	40
Vstřikovací tlak [MPa]	60	60	60
Velikost dotlaku [MPa]	35	40	40
Teplota trysky [°C]	280	260	260
Teplota zóny 1 [°C]	280	260	260
Teplota zóny 2 [°C]	275	255	255
Teplota zóny 3 [°C]	270	250	250
Teplota zóny 4 [°C]	260	240	240
Teplota formy [°C]	90	90	90

Při vstřikování bylo připraveno z každého polymerního materiálu 10 vzorků, které byly podrobeny mechanickým zkouškám s rozměry 100x100x2 mm a testu hořlavosti s rozměry 100x100x4 mm.



Obrázek 26 Vstřikovací stroj značky Mitsubishi 180 MET3 [58]



Obrázek 27 Použitá vstřikovací forma

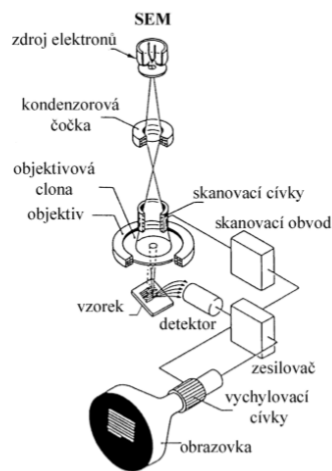
5 CHARAKTERIZACE RETARDÉRŮ HOŘENÍ

5.1 Metodika rastrovacího (skenovacího) elektronového mikroskopu (SEM) a elektronového disperzního spektrometru (EDX)

Rastrovací elektronový mikroskop využívá paprsek vysokoenergetických elektronů pro generování různých signálů na povrchu vzorku. Signály, které vycházející z interakce elektronů a vzorku, mapují vnější morfologii, chemické složení a krystalickou strukturu vzorku. Rastrový detektor zachycuje elektronový paprsek a jeho poloha je kombinovaná s detekovaným signálem pro vykreslení obrazu. K výhodám mikroskopu patří schopnost dosažení rozlišení větší než 1 nm a analyzovat vybraná místa povrchu vzorku pro stanovení chemických kompozic, krystalických struktur a orientací. [50–51]

Rastrovací elektronový mikroskop pracuje na principu zrychlených elektronů nesoucí kinetickou energii, která v okamžiku dotyku dopadajících elektronů na povrch vzorku rozletí v různé signály. Ty vznikají v důsledku vzájemných interakcí elektronů a vzorků a obsahují sekundární elektrony, zpětně rozptýlené elektrony (BSE), difraktované zpětně rozptýlené elektrony (EBSD), fotony, viditelné světlo a teplo. Pro zobrazení morfologie a topografie povrchu slouží zpětně rozptýlené elektrony. Zobrazení kontrastu poskytují difraktované zpětně rozptýlené elektrony. [50–51]

Použití SEM se často doplňuje o analýzu prvkového složení povrchu, pro kterou se používá elektronově disperzní spektrometr-EDX. Povrch zkoumaného vzorku je opatřen tenkou vrstvou kovového prášku, následně je vzorek umístěn na hliníkovou podložku, na které je oboustranně nalepena uhlíková páska. [50–51]

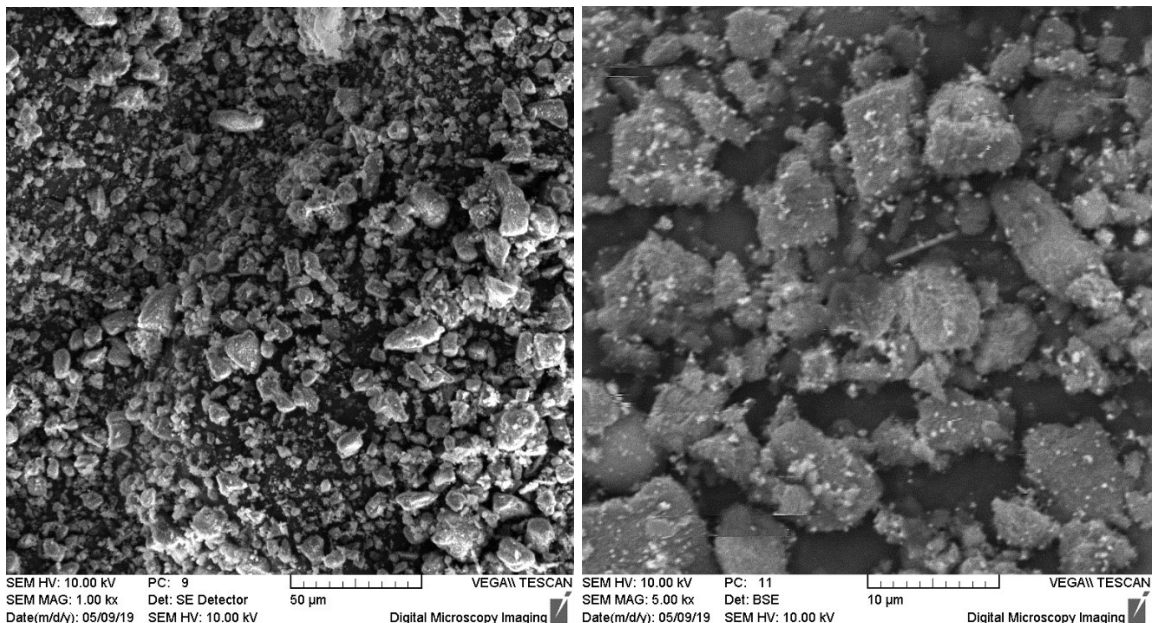


Obrázek 28 Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu [51]

5.2 Výsledky analýzy SEM a EDX

Morfologie každého retardéru hoření byla pozorována pomocí SEM VEGA LMU TESCAN. Použité urychlovací napětí bylo 10–20 kV.

Na obrázku 30 je vyfocena struktura směsi retardérů hoření B3 a E7. Při snímání bylo použito urychlovací napětí 10 kV. Na snímcích je zachycena velikostně rozdílná struktura, větší částice o velikosti 7–10 μm a malé útvary 1–5 μm . Při 5 000x zvětšení lze pozorovat nepravidelné tvary částic.

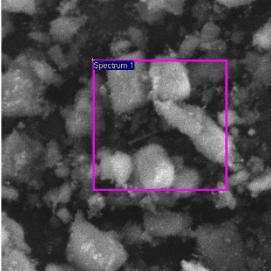
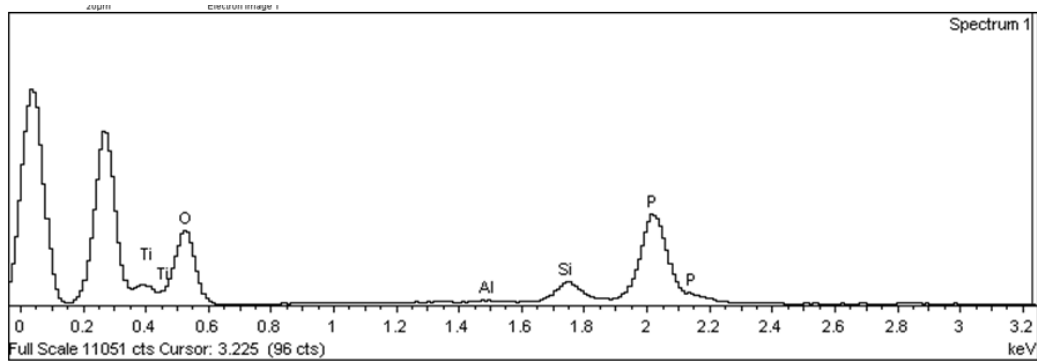


Obrázek 29 SEM fotografie retardérů hoření B3 a E7 při 10 kV, a) zvětšení 1 000x, b) zvětšení 5 000x

Pomocí analýzy EDX byla provedena prvková analýza směsi retardérů hoření B3 a E7.

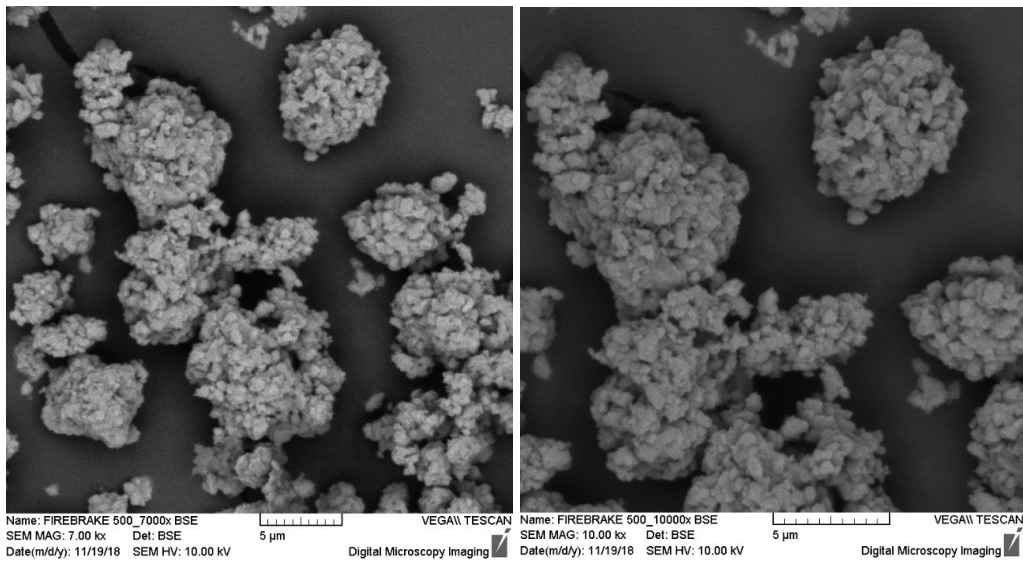
Tabulka 5 Prvková analýza EDX směsi retardérů B3 a E7

Element	App Conc.	Intensity Conn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
OK	57.39	1.0412	65.01	0.39	78.89
AlK	0.28	0.8864	0.37	0.08	0.26
SiK	3.45	0.9637	4.22	0.13	2.92
PK	28.19	1.3149	25.29	0.31	15.85
TiK	3.53	0.8153	5.11	0.16	2.07
Totals			100.00		

V grafu je viděn první pík, který zaznamenal elektronový šum, druhý pík byl stanoven jako obsah uhlíku. Nicméně šlo o chybu, kdy EDX zaznamenal hodnoty z uhlíkové pásky, na které byl vzorek umístěn. Analýza odhalila přítomnost kyslíku, hliníku, křemíku, fosforu a titanu. Přičemž hlavní složku tvoří kyslíka fosfor.

Obrázek 31 mapuje SEM morfologii retardéru hoření F5. Bylo použito urychlovací napětí 10 kV a jednotlivé fotografie se liší zvětšením, a) 7 000x, b) 10 000x. Vytvořené fotografie dokumentují pozorovatelné aglomeráty částic o velikosti 4–8 μm .

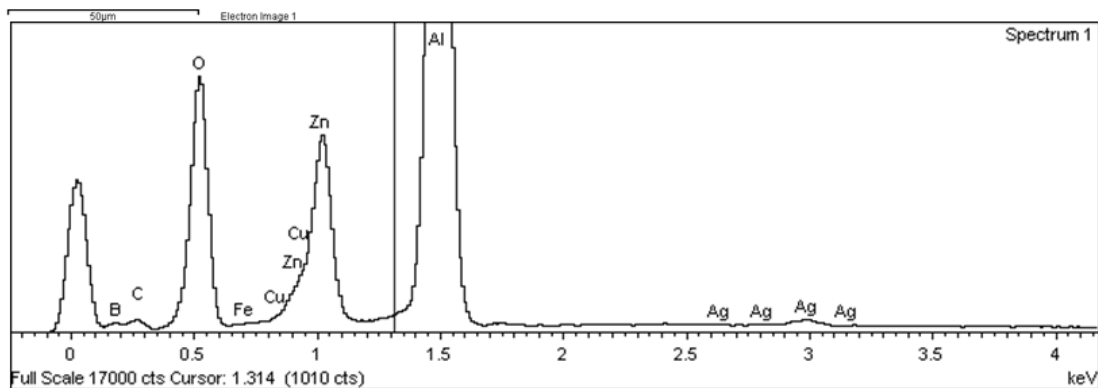
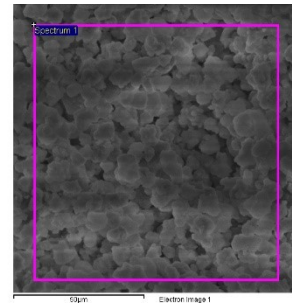


Obrázek 30 SEM fotografie retardéru hoření F5

Pomocí analýzy EDX byla provedena prvková analýza retardéru hoření F5.

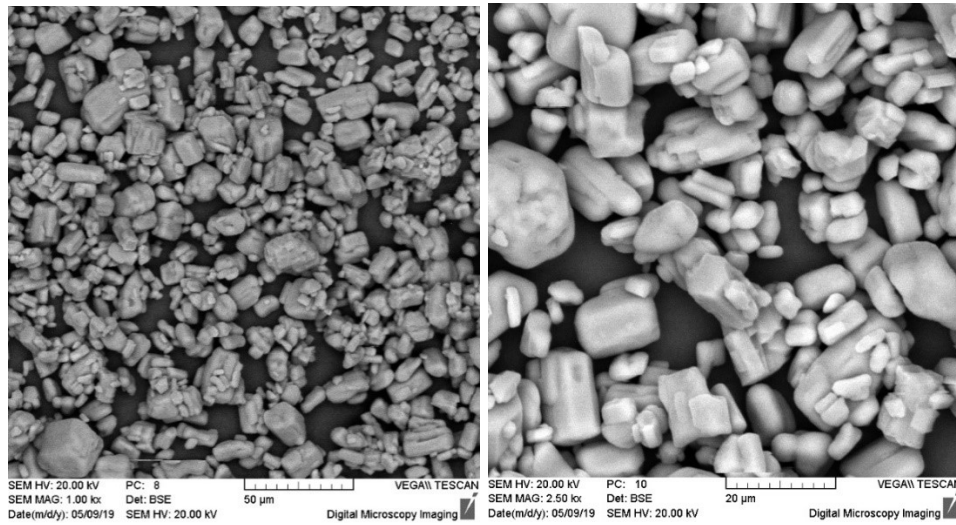
Tabulka 6 Prvková analýza EDX retardéru hoření F5

Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
B K	1.65	0.0694	13.69	1.99	25.15
C K	2.17	0.2247	5.58	0.32	9.23
O K	47.09	0.9391	28.97	0.68	35.97
Al K	45.32	0.8108	32.28	0.76	23.77
Fe K	0.25	0.9096	0.16	0.03	0.06
Cu K	2.73	0.8244	1.91	0.07	0.60
Zn K	23.97	0.8223	16.83	0.41	5.12
Ag L	0.77	0.7637	0.58	0.04	0.11
Totals			100.00		



Analýza EDX zaznamenala největší přítomnost hliníku, kyslíku, zinku a bóru. V malém množství byl zpozorován uhlík, ve stopovém množství pak železo, měď a stříbro. Dle materiálového listu se jedná o boritan zinečnatý.

Fotografie na obrázku 31 zobrazují strukturu retardéru hoření E4. Urychlovací napětí bylo 20 kV. Snímky zachycují částice s různým tvarem a velikostí.

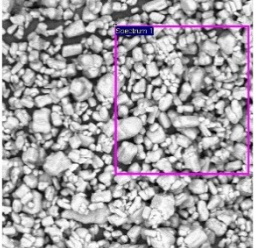
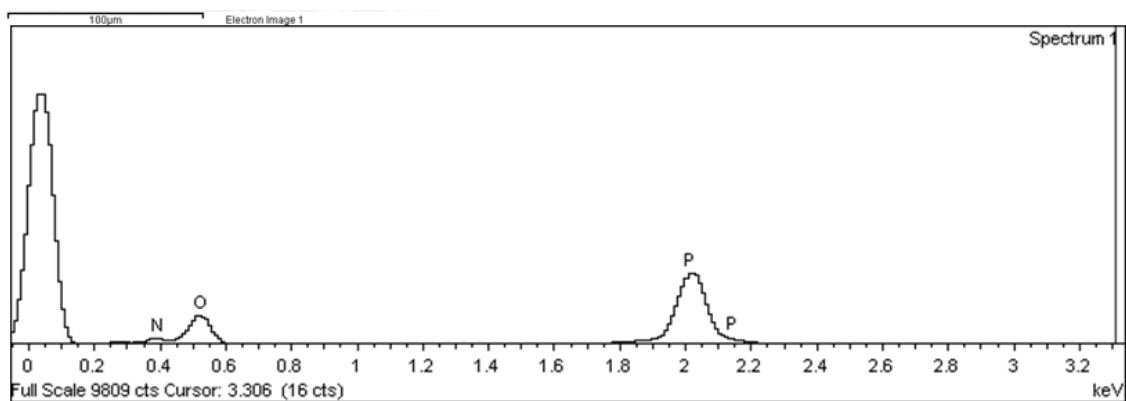


Obrázek 31 SEM fotografie retardéru hoření E4

Pomocí analýzy EDX byla provedena prvková analýza retardéru hoření E4.

Tabulka 7 Prvková analýza EDX retardéru hoření E4

Element	App Conc.	Intensity Corn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
NK	6.57	0.2535	14.70	1.37	19.38
OK	73.34	0.7790	53.38	1.04	61.60
PK	78.39	1.3922	31.92	0.69	19.03
Totals			100.00		

EDX zaznamenala vysoký obsah kyslíku, fosforu a dusíku. Retardér je na bázi polyfosfátu amonného.

6 CHARAKTERIZACE PŘIPRAVENÝCH VZORKŮ

6.1 Mechanické vlastnosti

Testování mechanických zkoušek bylo provedeno v laboratoři v Centru polymerních materiálů na zařízení stolním dvousloupovém trhacím stroji M350-5CT pro analýzu tahových vlastností a pro rázovou houževnatost bylo použito rázového kladiva Zwick 5113.

6.1.1 Metodika stanovení tahových vlastností

Tahová zkouška spadá do kategorie statických krátkodobých mechanických zkoušek. Principem zkoušky je namáhání zkušební vzorku v tahu. Tahová deformace probíhá při malých rychlostech posuvu čelistí. Přístroj provádějící tahovou zkoušku je opatřen jednou statickou čelistí, která je spojena s měřením síly a druhou čelistí, která se pohybuje definovanou rychlostí nezávisle na napětí. K provedení tahové zkoušky je definován tvar a rozměr zkušební tělíska uvedené v normě ČSN EN ISO 527-2. Tvar zkušební vzorku je designován do lopatky kvůli snadnému upevnění do čelistí. V zúžené části dochází ke koncentraci napětí. Při namáhání v tahu se zkušební tělísko začne deformovat do rovnovážného bodu mezi deformací a vyvozeným napětím a za současné podmínky, že před vznikem rovnovážného bodu nedojde k přetržení tělíska. [54–55]

$$\sigma = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Tahovým namáháním dochází k délkové změně vzorku, která je definována jako poměrné prodloužení. [55]

$$\varepsilon_L = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-]$$

Zároveň dochází k poměrnému zkrácení, které je vztaženo na velikost průřezu zkušební vzorku. [55]

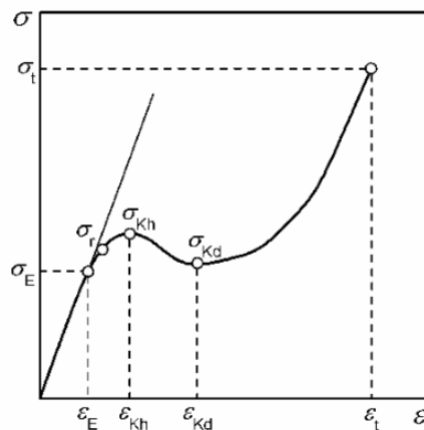
$$\varepsilon = \frac{\Delta b}{b_0} \quad [-]$$

Z tahové křivky je stanovena hodnota Youngova modulu E.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [Pa]$$

Je stanoven v oblasti lineární závislosti mezi napětím a deformací. Youngův modul určuje tuhost materiálu a je závislý na čase, teplotě a prostředí. [55]

Výsledkem tahových zkoušek je tahová křivka, na které je zaznamenáno několik důležitých bodů – mez úměrnosti σ_E , mez pružnosti σ_r a mez kluzu σ_K . [55]



Obrázek 32 Ukázka tahové křivky [55]

Další klíčovou hodnotou je pevnost v tahu. Hodnota je definována jako napětí, které je potřebné k destrukci zkušebního vzorku vztažené na původní průřez. [55]

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A_0} [Pa]$$

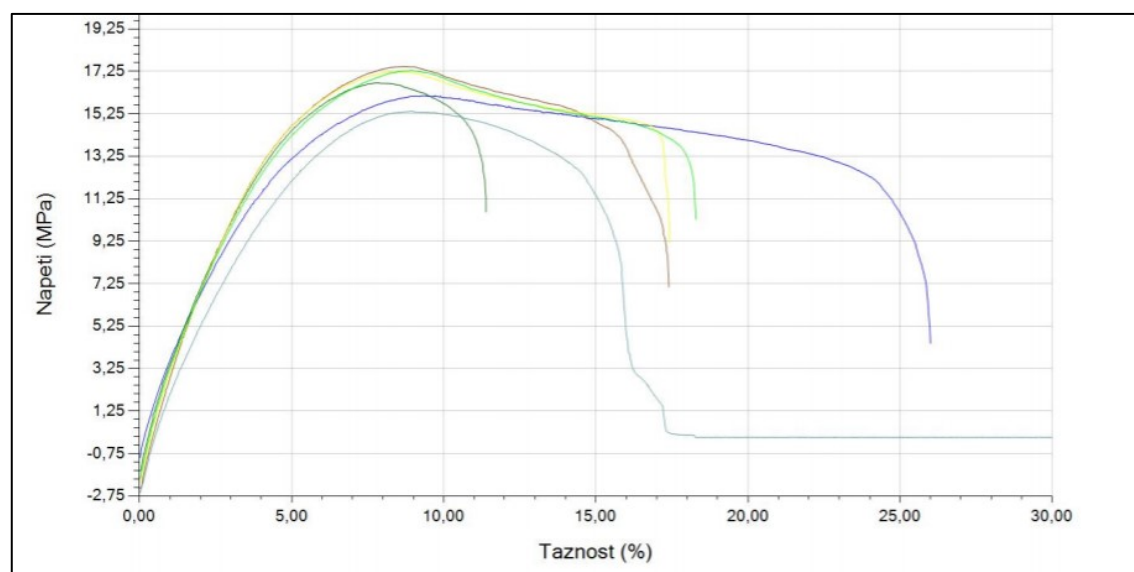
6.1.2 Výsledky tahové zkoušky

Tahová zkouška byla provedena na tělískách ve tvaru lopatky s rozměry pracovními částmi 30 x 10 x 2 mm dle normy ČSN EN ISO 527-2. Měření bylo provedeno při rychlosti odtahu 10 mm/min. Z tahových zkoušek byly vyhodnoceny veličiny: Youngův modul, napětí v mezi kluzu a tažnost v mezi kluzu. Pro prezentaci výsledků byly v tabulkách uvedeny hodnoty pro 4 zkušební tělíška. Pro vyhotovení polykarbonátových směsí byly uvedeny hodnoty pro 5 zkušebních tělísek. Následně je uvedena hodnota průměru, mediánu a směrodatné odchylky.

Měření tahových vlastností polypropylenových vzorků se složením 75hm.% PP a 25hm.% směsí retardérů B3 + E7.

Tabulka 8 Tahové vlastnosti vzorku PP1

<i>PP 1</i>	<i>Youngův modul [MPa]</i>	<i>Napětí v mezi kluzu [MPa]</i>	<i>Tažnost v mezi kluzu [%]</i>
1	323,6	16,1	9,4
2	375,4	16,7	8,1
3	391,1	17,1	8,6
4	391,4	17,2	8,3
Průměr	386,0	17,0	8,3
Medián	391,1	17,1	8,3
Směrodatná odchylka	27,8	0,4	0,5

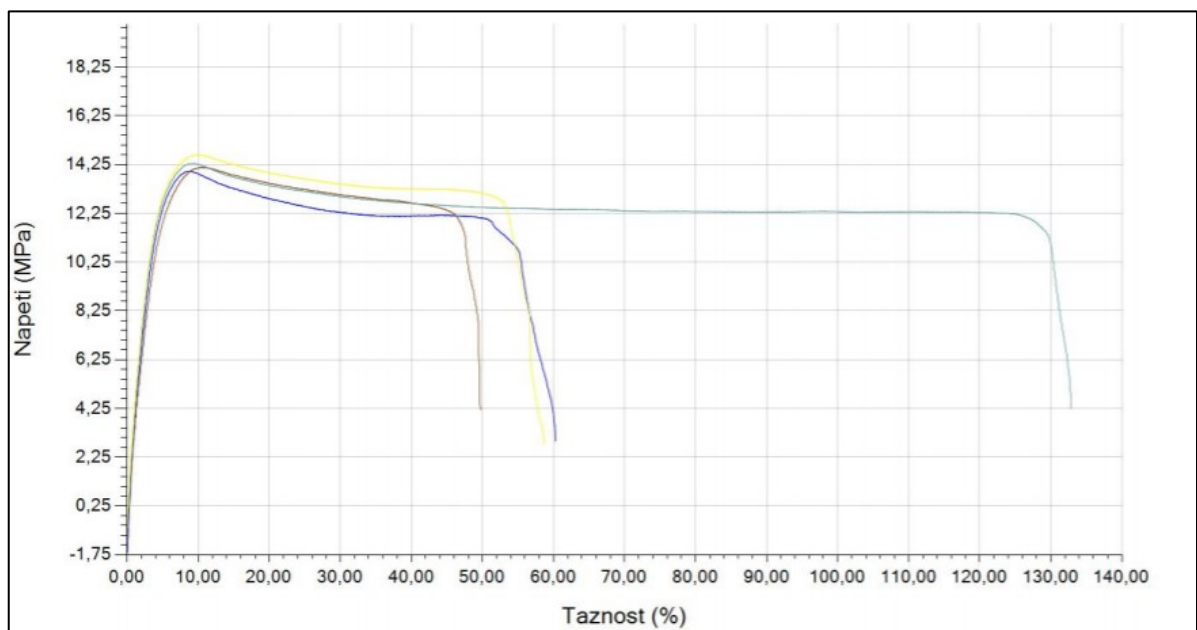


Obrázek 33 Tahové křivky vzorků PP1

Měření tahových vlastností polypropylenových vzorků se složením 70hm.% PP a 30hm.% směsí retardérů B3 + E7.

Tabulka 9 Tahové vlastnosti vzorku PP2

PP 2	Youngův modul [MPa]	Napětí v mezi kluzu [MPa]	Tažnost v mezi kluzu [%]
1	380,3	14	8,7
2	340,4	14,2	10,2
3	379,1	14,3	9,5
4	370,2	14,6	9,7
Průměr	367,5	14,3	9,5
Medián	374,65	14,25	9,6
Směrodatná odchylka	16,12529	0,216506	0,540255

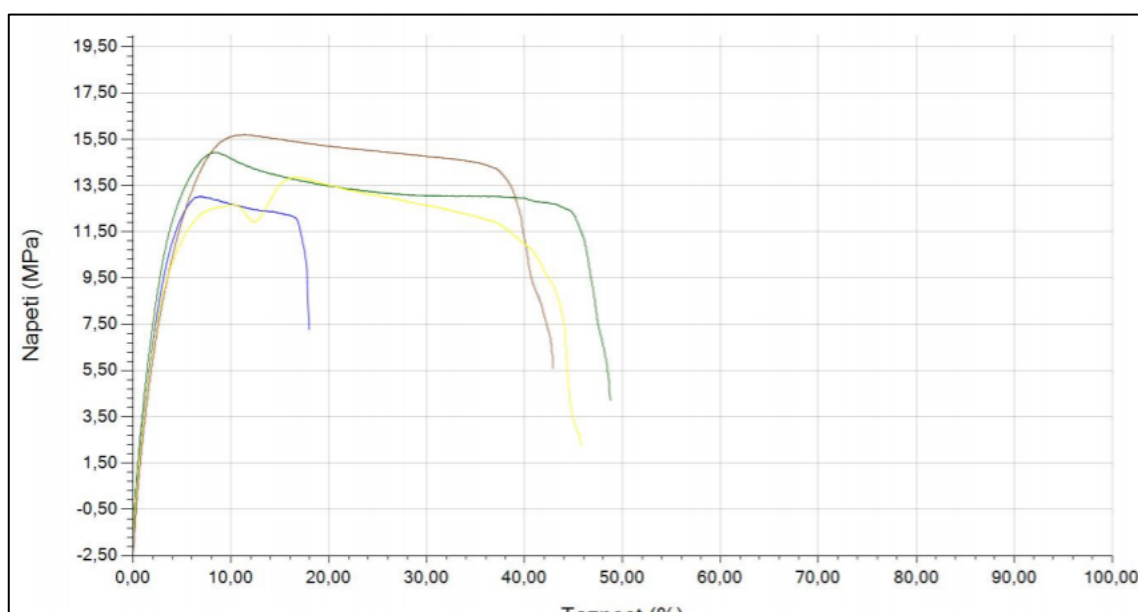


Obrázek 34 Tahové křivky vzorků PP2

Měření tahových vlastností polypropylenových vzorků se složením 70hm.% PP, 25hm.% směsí retardérů B3 + E7 a 5 hm.% F5.

Tabulka 10 Tahové vlastnosti vzorku PP3

PP 3	Youngův modul [MPa]	Napětí v mezi kluzu [MPa]	Tažnost v mezi kluzu [%]
1	380,0	13,0	6,9
2	410,3	14,8	8,1
3	385,9	15,7	9,4
4	389,4	13,5	9,8
Průměr	391,4	14,3	8,6
Medián	387,7	14,2	8,8
Směrodatná odchylka	11,4	1,1	1,1

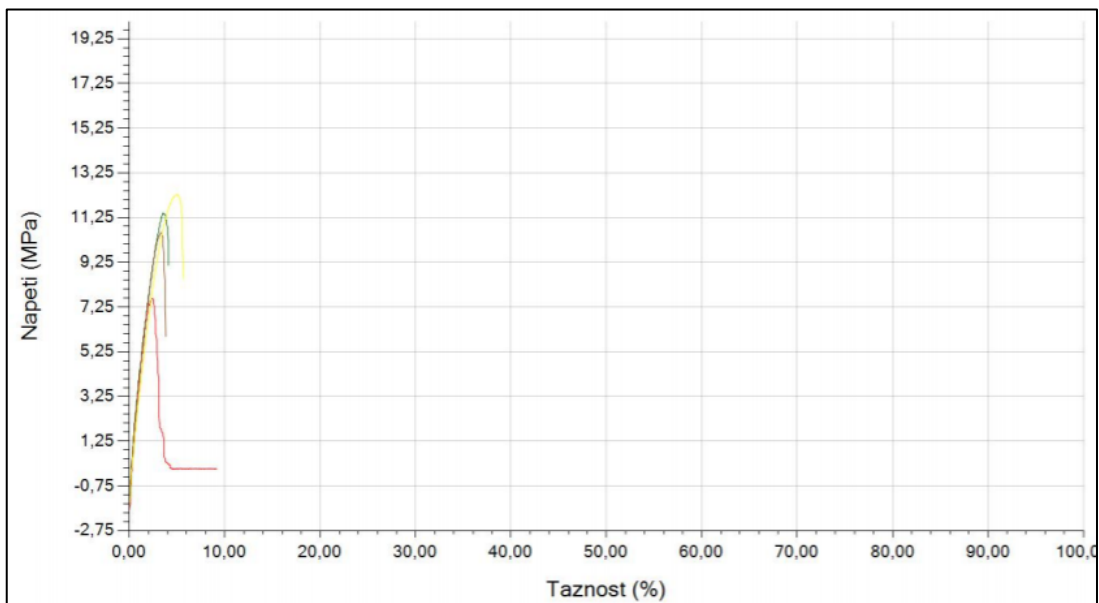


Obrázek 35 Tahové křivky vzorků PP3

Měření tahových vlastností polypropylenové směsi se složením 65hm.% PP a 35hm.% směsí retardérů B3 + E7.

Tabulka 11 Tahové vlastnosti vzorku PP4

PP 4	Youngův modul [MPa]	Napětí v mezi kluzu [MPa]	Tažnost v mezi kluzu [%]
1	491,4	7,6	2,5
2	466,6	11,4	3,6
3	466,3	10,6	3,3
4	420,8	12,2	4,7
Průměr	461,3	10,5	3,5
Medián	466,5	11,0	3,5
Směrodatná odchylka	25,2	1,7	0,8

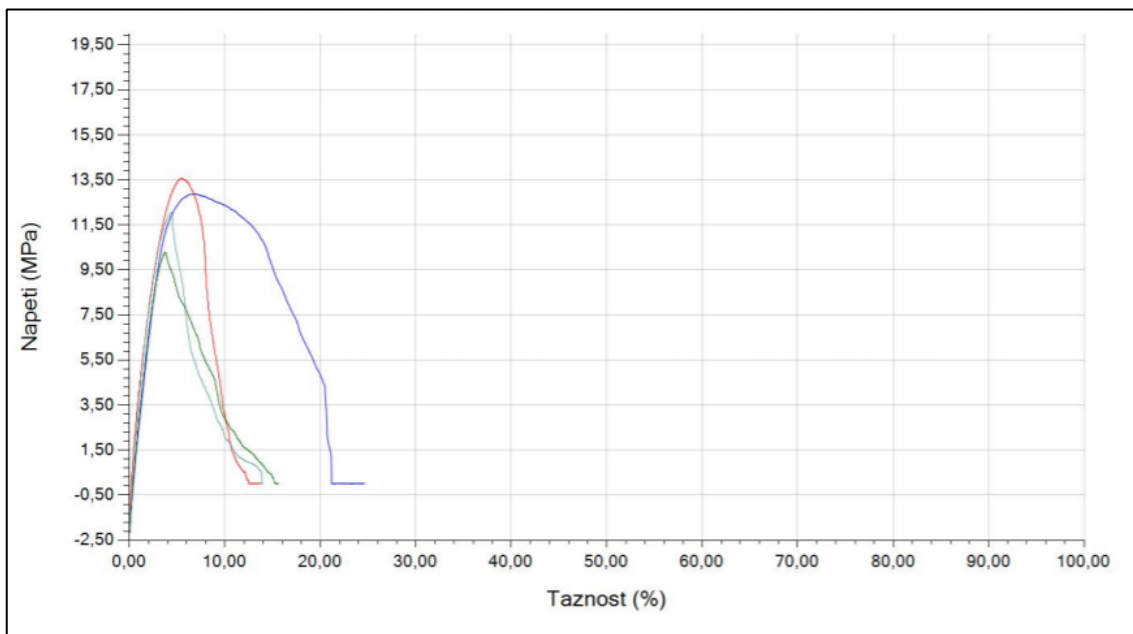


Obrázek 36 Tahové křivky vzorků PP4

Měření tahových vlastností polypropylenové směsi se složením 65hm.% PP a 25hm.% směsi retardérů B3 a E7 + 10hm% F5.

Tabulka 12 Tahové vlastnosti vzorků PP5

PP 5	Youngův modul [MPa]	Napětí v mezi kluzu [MPa]	Tážnost v mezi kluzu [%]
1	386,6	12,9	6,4
2	435,0	13,6	5,8
3	444,1	10,3	4,5
4	453,4	12,5	4,8
Průměr	429,8	12,3	5,4
Medián	439,6	12,7	5,3
Směrodatná odchylka	25,8	1,2	0,8

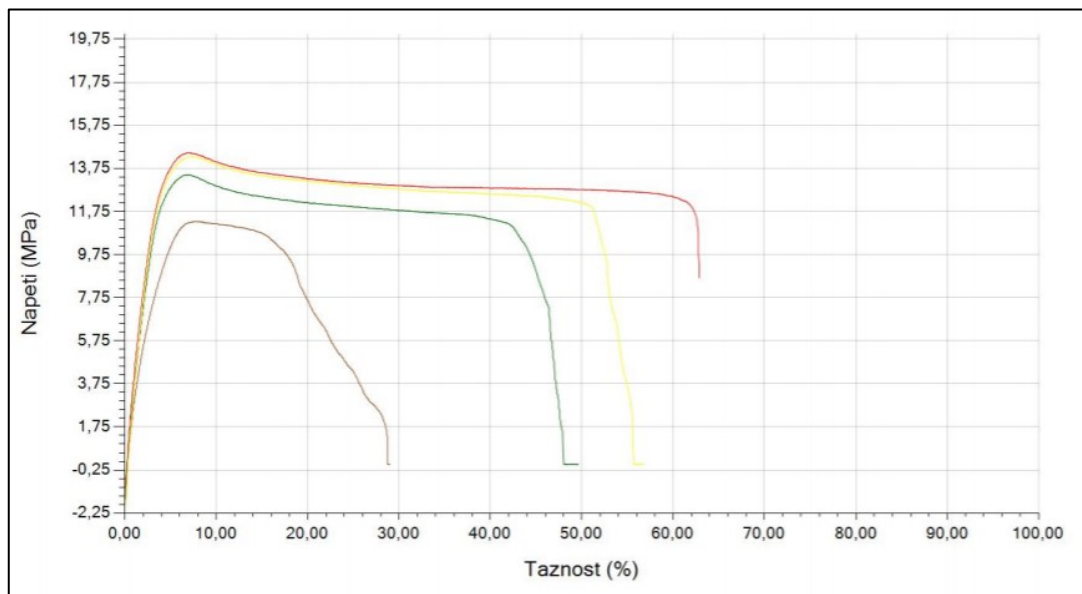


Obrázek 37 Tahové křivky vzorků PP5

Měření tahových vlastností polypropylenové směsi se složením 65hm.% PP a 30hm.% směsí retardérů B3 + E7 a 5hm% F5.

Tabulka 13 Tahové vlastnosti vzorku PP6

PP 6	Youngův modul [MPa]	Napětí v mezi kluzu [MPa]	Tažnost v mezi kluzu [%]
1	461,3	14,5	7,0
2	416,6	13,5	6,8
3	300,2	11,3	7,6
4	430,1	14,3	7,0
Průměr	402,1	13,4	7,1
Medián	423,4	13,9	7,0
Směrodatná odchylka	61,0	1,3	0,3



Obrázek 38 Tahové křivky vzorků PP6

Tabulka 14 Shrnutí průměrných hodnot parametrů pro vzorky PP

<i>PP vzorky</i>	<i>Youngův modul [MPa]</i>	<i>Napětí v mezi kluzu [MPa]</i>	<i>Tážnost v mezi kluzu [%]</i>
<i>PP0</i>	1400,0	25,5	9,0
<i>PP1</i>	386,0	17,0	8,3
<i>PP2</i>	367,5	14,3	9,5
<i>PP3</i>	391,4	14,3	8,6
<i>PP4</i>	461,3	10,5	3,5
<i>PP5</i>	429,8	12,3	5,4
<i>PP6</i>	402,1	13,4	7,1

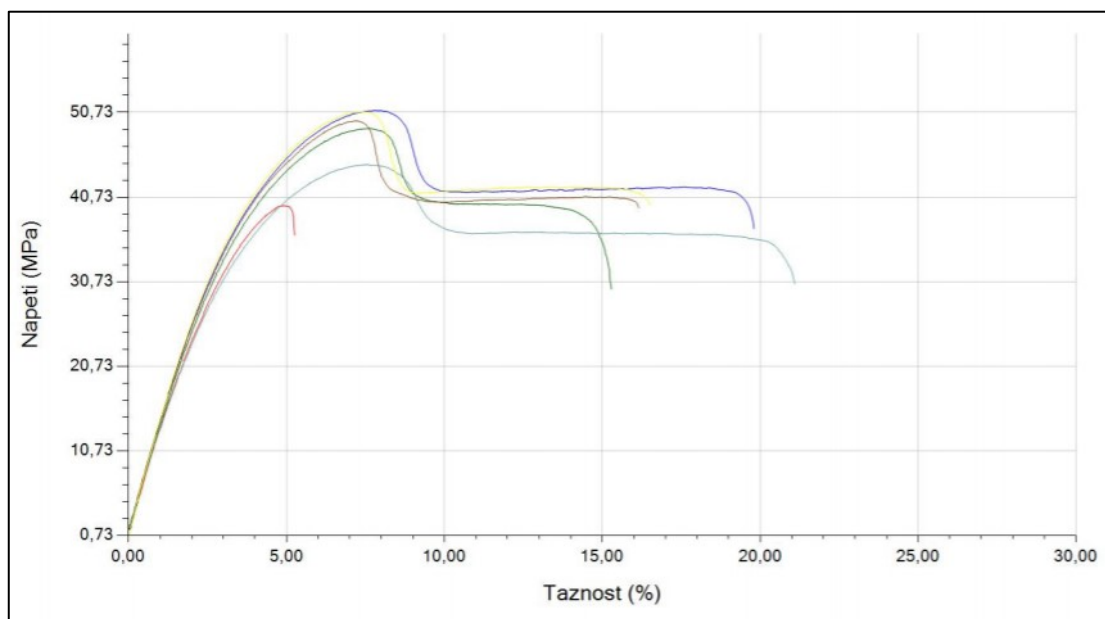
Tabulka 14 shrnuje naměřené průměrné hodnoty pro tahové vlastnosti PP vzorků. Pro porovnání byly uvedeny hodnoty čistého PP. Důležitým parametrem pro sledování mechanických vlastností materiálu je hodnota Youngova modulu pružnosti. Tento parametr poskytuje informaci o tuhosti materiálu. Hodnota Youngova modulu je nejmenší u vzorku PP2, a to 367,5 MPa. Nejvyšší hodnota Youngova modulu pružnosti byla naměřena u vzorku směsi PP4, a to 461,3 MPa. Lze si všimnout výrazného snížení hodnot modulu pružnosti v porovnání s čistým PP, 1400 MPa. Dalším sledovaným parametrem je napětí v mezi kluzu. Jedná se o hodnotu napětí, kdy dochází u termoplastického materiálu ke tvorbě krčku na vzorku lopatky. Napětí na mezi kluzu dosahuje nejmenší hodnoty u vzorku PP4, 10,5 MPa,

a nejvyšší u vzorku PP1, 17,0 MPa. Při hodnocení výsledků parametru tažnosti v mezi kluzu byla zaznamenána nejvyšší hodnota u vzorku směsi PP2, 9,5 %, která překonala i hodnoty čistého PP. Nejmenší hodnota tažnosti v mezi kluzu byla vysledována u vzorku směsi PP4, 3,5 %.

Měření tahových vlastností polykarbonátového materiálu – PC Makrolon.

Tabulka 15 Tahové vlastnosti – PC Makrolon

<i>PC Makrolon</i>	<i>Youngův modul [MPa]</i>	<i>Napětí v mezi kluzu [MPa]</i>	<i>Tažnost v mezi kluzu [%]</i>
1	1224,3	51,0	7,7
2	1252,3	39,6	5,8
3	1229,2	48,8	7,6
4	1219,3	49,7	7,1
5	1301,9	50,7	7,4
Průměr	1245,4	48,0	7,1
Medián	1229,2	49,7	7,4
Směrodatná odchylka	30,4	4,3	0,7

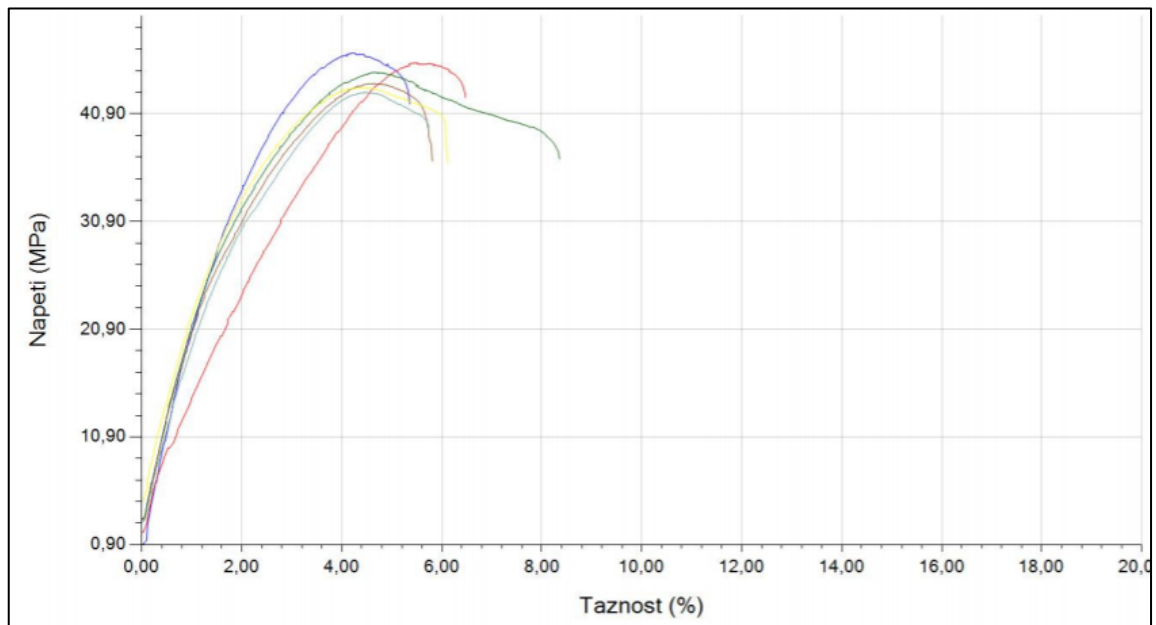


Obrázek 39 Tahové křivky vzorků PC Makrolon

Měření tahových vlastností polykarbonátového materiálu – Bayblend TP 2139.

Tabulka 16 Tahové vlastnosti vzorku Bayblend TP 2139

Bayblend TP 2139	Youngův modul [MPa]	Napětí v mezi kluzu [MPa]	Tažnost v mezi kluzu [%]
1	2027,3	46,5	4,2
2	2020,9	44,7	4,6
3	1871,1	43,7	4,5
4	1782,3	42,9	4,4
5	1778,5	43,3	4,4
Průměr	1896,0	44,2	4,4
Medián	1871,1	43,7	4,4
Směrodatná odchylka	109,7	1,3	0,1

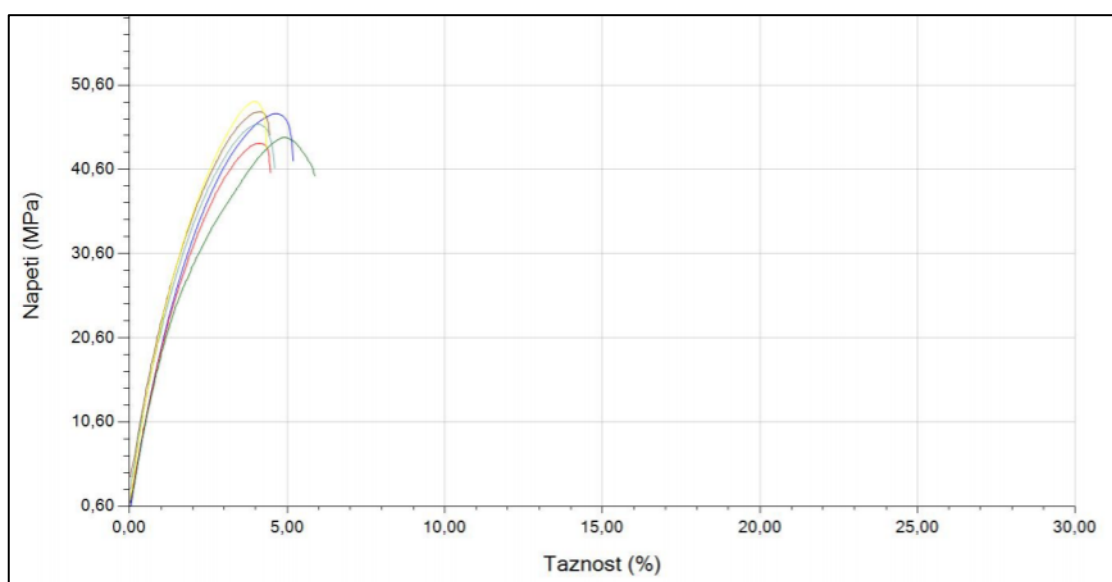


Obrázek 40 Tahové křivky vzorků Bayblend TP 2139

Měření tahových vlastností polykarbonátového materiálu – Bayblend FR411 MT.

Tabulka 17 Tahové vlastnosti vzorků Bayblend FR411 MT

Bayblend FR411 MT	Youngův modul [MPa]	Napětí v mezi kluzu [MPa]	Tažnost v mezi kluzu [%]
1	1948,1	47,2	4,5
2	1782,9	43,7	4,1
3	1810,8	44,3	4,9
4	1828,1	45,9	4,1
5	1887,1	48,6	4,0
Průměr	1851,4	45,9	4,3
Medián	1828,1	45,9	4,1
Směrodatná odchylka	59,2	1,8	0,3



Obrázek 41 Tahové křivky vzorků Bayblend FR411 MT

Tabulka 18 Shrnutí průměrných hodnot parametrů pro vzorky PC materiálů

PC vzorky	Youngův modul [MPa]	Napětí v mezi kluzu [MPa]	Tažnost v mezi kluzu [%]
PC Makrolon	1245,4	48,0	7,1
Bayblend TP 2139	1896,0	44,2	4,4
Bayblend FR411 MT	1851,4	45,9	4,3

V tabulce 19 je shrnutí průměrných hodnot každého testovaného polykarbonátového materiálu. Retardéry hoření ovlivňují mechanické a fyzikální vlastnosti. Nicméně z uvedených hodnot vyplývá skutečnost, že komerční materiály jsou retardovány se zvýšením hodnot v modulu pružnosti, napětí v mezi kluzu a za současného snížení hodnot tažnosti v mezi kluzu.

6.1.3 Metodika stanovení rázové a vrubové houževnatosti pomocí metody Charpy

Houževnatost je vlastnost materiálu nepodléhat vzniku a šíření trhliny. Z této dynamické zkoušky je možné vysledovat chování materiálu při nárazu, jeho tvaru lomu, jeho šíření. Výsledky jsou ovlivněny druhem materiálu, složením, teplotou prostředí, podmínkami provedení zkoušky nebo tvarem zkušebního vzorku. [52–53]

Principem zkoušky je namáhání zkušebního tělesa rázem. Metoda Charpy je založena na umístění zkušebního vzorku na dvou podpěrách, kde uprostřed otáčivé kladivo způsobí přeražení vzorku v kolmém směru. Pokud byly vzorky opatřeny vrubem, dopadalo kladivo na protilehlou stranu vzorku k vrubu. [52–53]

Pro potřeby zkoušky bylo použito instrumované rázové Charpyho kladivo o jmenovité energii 5 J.

Rázová houževnatost se vypočítá dle rovnice:

$$a_{cV} = \frac{W_b}{hb} \times 10^3 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

kde: W_b – energie potřebná k přeražení vzorku [J], h – tloušťka vzorku [mm], b – šířka vzorku [mm]. [52–53]

Pro stanovení vrubové houževnatosti byl použit přístroj pro vytvoření vrubu značky Instron. (obr. 42)



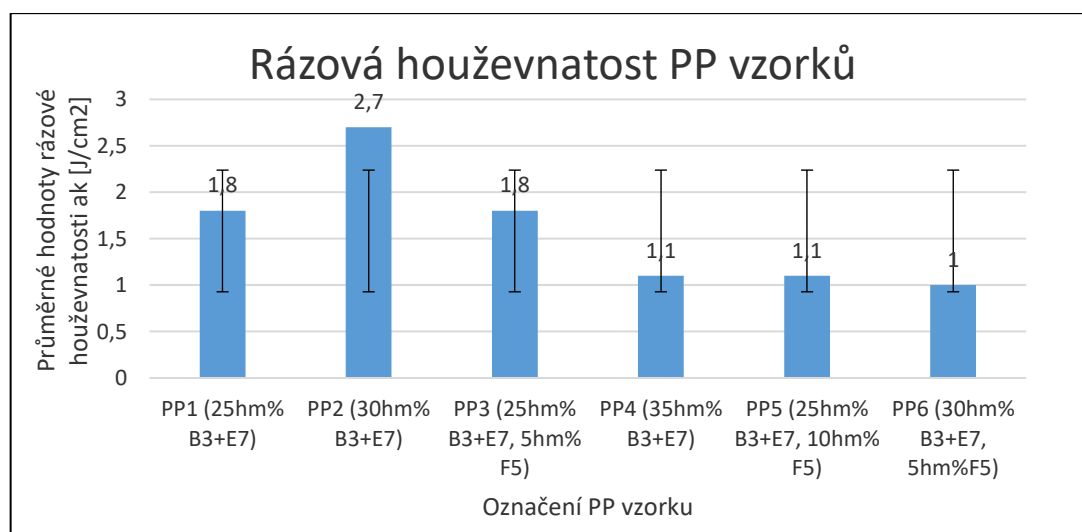
Obrázek 42 Přístroj na vyražení vrubu do zkušebního tělíska

6.1.4 Výsledky rázové a vrubové houževnatosti

Pomocí Charpyho kladiva byly zaznamenány hodnoty rázové a vrubové houževnatosti a postup metodiky byl podle normy ISO 179. Programem testXpert 9. 1. byly vyhodnoceny parametry vrubové nebo rázové houževnatosti a_k [J/cm^2] a spotřebovaná deformační energie potřebná na přeražené tělísko V [J]. Rozměry zkušebních tělísek byly 10 mm výška a 50 mm délka. Tloušťka tělísek se pohybovala od 2 do 4 mm. Rozměrové hodnoty jednotlivých vzorků byly před každým testem rázu zapisovány do vyhodnocovacího programu.

Tabulka 19 Výsledky měření rázové houževnatosti pro PP vzorky

Rázová houževnatost PP vzorků a_k [J/cm^2]						
Pořadí vzorku	PP1 (25hm% B3+E7)	PP2 (30hm% B3+E7)	PP3 (25hm% B3+E7, 5hm% F5)	PP4 (35hm% B3+E7)	PP5 (25hm% B3+E7, 10hm% F5)	PP6 (30hm% B3+E7, 5hm%F5)
1	1,8	3,0	1,1	1,2	1,6	0,7
2	1,5	3,0	1,5	0,7	1,6	1,1
3	2,1	2,8	1,7	1,4	1,1	1,1
4	1,6	1,8	2,5	1,6	1,3	1,0
5	1,6	2,0	2,6	1,0	0,5	1,2
6	2,0	3,3	1,3	0,8	0,3	1,0
Průměr	1,8	2,7	1,8	1,1	1,1	1,0
Medián	1,7	2,9	1,6	1,1	1,2	1,0
Směrodatná odchylka	0,2	0,6	0,6	0,3	0,5	0,2



Obrázek 43 Porovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti pro PP vzorky

Tabulka 20 shrnuje dosažené výsledky při měření rázové houževnatosti. Opět výsledky dokazují ovlivnění mechanických vlastností v důsledku použití retardérů hoření. Nejvyšší průměrnou hodnotu rázové houževnatosti byla naměřena u PP2, který obsahuje 70 hm. % PP a 30 hm. % retardérů hoření, a to $a_k=2,6 \text{ J/cm}^2$. Nejnižší hodnota byla naměřena u poslední testovaného tělíška PP6, který obsahuje 65hm% PP, 30hm% E7 a 5hm% F5, $a_k=1,0 \text{ J/cm}^2$.

Lze si všimnout z grafu, že u měření posledních třech vzorků, PP4, PP5 a PP6, se hodnota rázové houževnatosti pohybuje od 1,0 do 1,1 J/cm^2 . Výsledky jsou dosti podobné, důvodem může být stejná hmotnostní procentuální hodnota plnění. Všechny tyto vzorky jsou plněny z 35 hm% retardéry hoření.

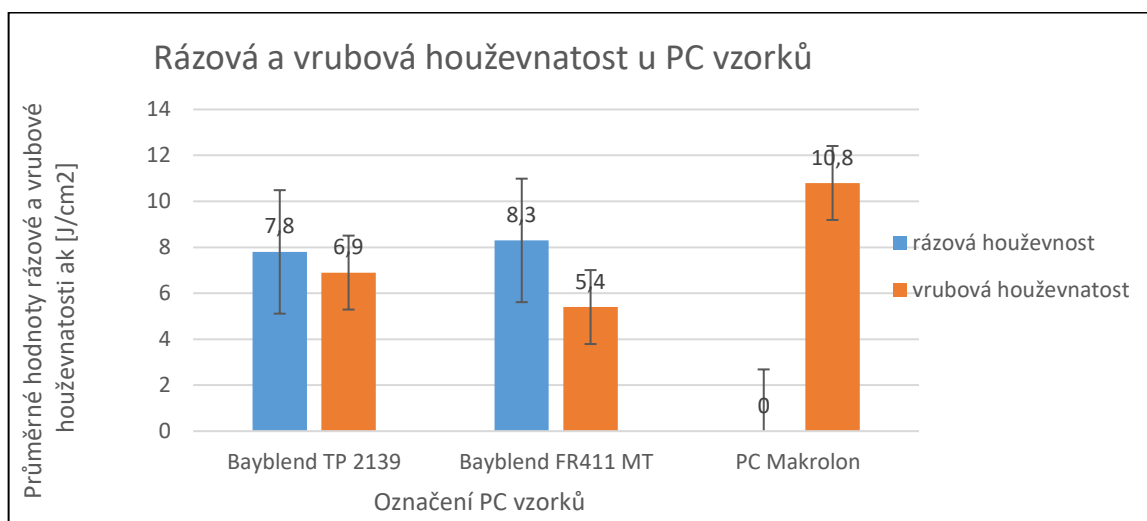
Průměrné naměřené hodnoty rázové houževnatosti jsou v porovnání o dost nižší oproti uvedené hodnotě v materiálovém listě u čistého PP. Hodnota rázové houževnatosti pro PP, který byl použit, je 9 J/cm^2 . Při použití retardérů hoření se výrazně snížily hodnoty rázové houževnatosti.

Tabulka 20 Výsledky měření rázové houževnatosti pro PC vzorky

Rázová houževnatost PC vzorků $a_k \text{ [J/cm}^2\text{]}$			
Pořadí vzorku	Bayblend TP 2139	Bayblend FR411 MT	PC Makrolon
1	13,2	4,3	-
2	4,6	13,1	-
3	5,2	11,1	-
4	4,5	4,2	-
5	15,4	5,2	-
6	3,6	12,1	-
<i>Průměr</i>	7,8	8,3	-
<i>Medián</i>	4,9	8,2	-
<i>Směrodatná odchylka</i>	4,7	3,8	-

Tabulka 21 Výsledky měření vrubové houževnatosti pro PC vzorky

Vrubová houževnatost PC vzorků a_k [J/cm ²]			
Pořadí vzorku	Bayblend TP 2139	Bayblend FR411 MT	PC Makrolon
1	7,8	6,9	8,8
2	6	6,2	8,9
3	2,1	2,9	8,1
4	9	1,3	13,5
5	10,6	7,5	12,2
6	6,1	7,7	13,4
Průměr	6,9	5,4	10,8
Medián	7,0	6,6	10,6
Směrodatná odchylka	2,7	2,4	2,3

Obrázek 44 Porovnání rázové a vrubové houževnatosti a_k pro PC vzorky

Tabulka 21 a 22 sleduje výsledky při měření rázové a vrubové houževnatosti se vzorky s PC. Průměrná hodnota rázové houževnatosti byla naměřena pro polymerní směs Bayblend TP 2139, $a_k = 7,8 \text{ J/cm}^2$ a pro polymerní směs Bayblend FR411 MT byla naměřena $a_k = 8,3 \text{ J/cm}^2$. Hodnota pro PC Makrolon nebyla změřena z důvodu nepřeražení zkušební vzorku, bylo pouze ohnuto a protlačeno mezi podpěrami.

Vrubová houževnatost byla měřitelná pro všechny tři typy vzorků s PC. Průměrná hodnota vrubové houževnatosti byla naměřena pro polymerní směs Bayblend TP 2139 $a_k = 6,9 \text{ J/cm}^2$ a pro polymerní směs Bayblend FR411 MT byla naměřena $a_k = 5,413 \text{ J/cm}^2$. Průměrná hodnota pro PC Makrolon vrubové houževnatosti byla $10,8 \text{ J/cm}^2$.

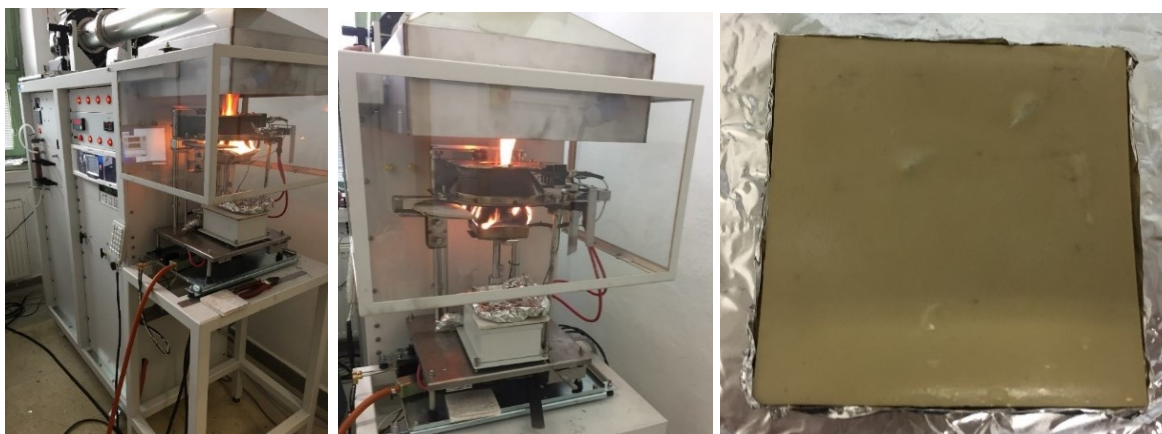
6.2 Hořlavost

Pro zhodnocení výsledků diplomové práce jsou klíčové výsledky testování materiálu z pohledu hořlavosti. Hořlavost materiálu byla testována na kónickém kalorimetru a postup zkoušky odpovídal normě ISO 5660-1. [65]

6.2.1 Metodika testování hořlavosti na kónickém kalorimetru

Zkouška hořlavosti materiálů byla provedena na kónickém kalorimetru. Pomocí experimentálního zařízení byla charakterizována a zaznamenávána spotřeba kyslíku, úbytek hmotnosti, rychlost uvolňování tepla, teplota výhřevní spirály, produkce kouře, doba hoření nebo celkový únik tepla. [65]

Zkušební tělíska ke zkoušce hořlavosti mají definovaný rozměr 100 x 100 mm dle odpovídající normy ISO 5660-1. Před samotnou zkouškou je nutná kalibrace kónického kalorimetru, která spočívá v nastavení analyzátoru kyslíku s definovanou koncentrací kyslíku v okolí. Hodnota byla nastavena na 20,95 %. Dále je nutné kalibrovat objemový průtok ventilátoru pro odtah zplodin při hoření, nastavení požadovaného výkonu zařízení na definovanou hodnotu 50kWm^{-2} a nastavení teploty spirály uvnitř kónického kalorimetru na $760\text{ }^{\circ}\text{C}$. Před jednotlivými zkouškami hořlavosti probíhá tárování vah v kalorimetru a vážení jednotlivých vzorků pro stanovení hmotnostního úbytku. [65]



Obrázek 45 Kónický kalorimetr, ukázka vzorku PC

Proces hoření je spuštěn po umístění zabaleného vzorku do alobalu a vložení do držáku, který je opatřen izolační minerální vatou. Je otevřena izolační nehořlavá clona a přiložen jiskrový iniciátor. Zkouška hoření probíhá za působení kónického zářiče za definovaných podmínek dle normy. [65]

6.2.2 Výsledky zkoušky hořlavosti

Během testování hořlavosti vzorků byly zaznamenány a vyhodnocovány tyto parametry: rychlost uvolňování tepla (kW/m^2), celková produkce kouře (m^3), celkový únik tepla (MJ/m^2), hmotnostní ztráta (%), délka hoření vzorku (s) a hodnota Marhe (kW/m^2). Daná hodnota Marhe definuje hodnotu uvolňování tepla (kW/m^2).

Při vyhodnocení výsledků byla směřována pozornost na rychlost uvolňování tepla HRR (z angl. Heat release rate) v kW/m^2 . Výhodou daného parametru je fakt, že tato hodnota mapuje časovou závislost uvolňování tepla. Výsledky parametru byly vkládány do grafů pro zobrazení rychlosti uvolňování tepla v časové závislosti.

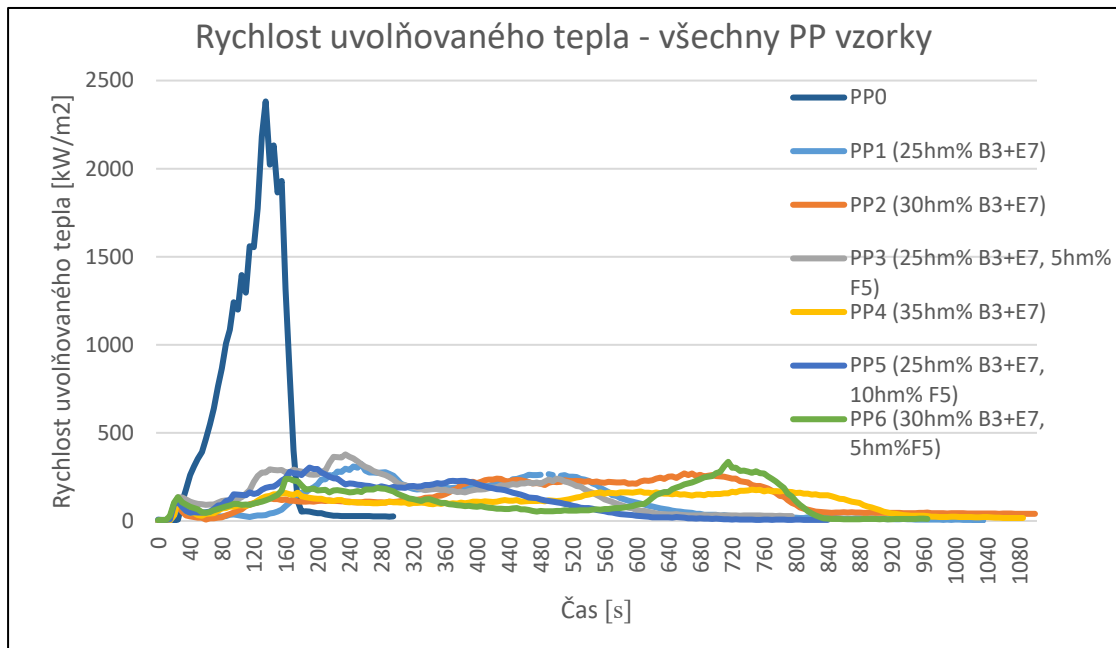
Následující tabulky zobrazují hlavní výsledky, kterých bylo dosaženo během působení zkoušky hořlavosti materiálu pro jednotlivé vzorky směsí s retardéry hoření.

Tabulka 22 Výsledky zkoušky hořlavosti pro vzorky PP

Vzorek	Průměrná rychlost uvolňování tepla (HRR) [kW/m^2]	Celková produkce kouře [m^3]	Celkový únik tepla [MJ/m^2]	Hmotnostní ztráta [%]	Doba hoření vzorku [s]
PP0	396,9	8,7	108,0	98,0	300,0
PP1 (25hm% B3+E7)	158,0	63,2	159,8	80,2	1035,0
PP2 (30hm% B3+E7)	132,4	15,7	142,7	85,3	1100,0
PP3 (25hm% B3+E7, 5hm% F5)	161,6	14,3	125,2	82,7	795,0
PP4 (35hm% B3+E7)	107,9	6,3	114,3	81,6	1085,0
PP5 (25hm% B3+E7, 10hm% F5)	116,9	10,6	95,8	76,9	840,0
PP6 (30hm% B3+E7, 5hm%F5)	116,8	11,5	110,4	82,9	965,0

Průměrnou nejvyšší hodnota HRR byla zaznamenána u vzorku PP3. Nejnižší průměrná hodnota HRR byla zaznamenána u vzorku PP4. Hodnoty HRR pro čistý PP jsou uvedeny pro porovnání hoření systému bez retardérů.

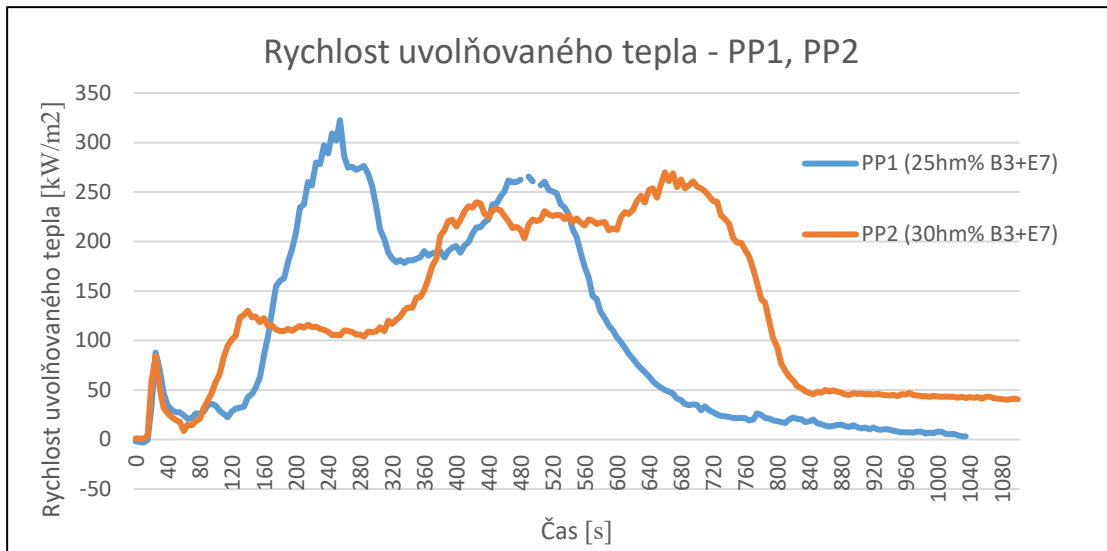
Porovnání všech PP vzorků z pohledu HRR v závislosti na čase



Obrázek 46 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PP

Hodnota maximam HRR pro PP0 – 1646,3 kW/m²

PP1 (25hm% B3+E7) a PP2 (30hm% B3+E7)



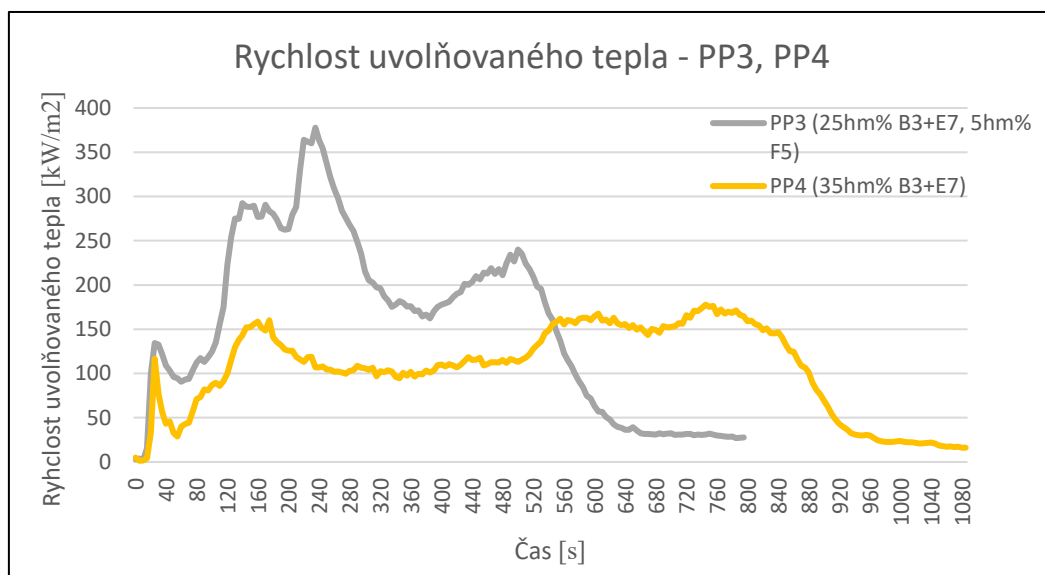
Obrázek 47 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PP1 a PP2

Při testování vzorku směsí PP1 a PP2 byly pozorovány podobné výsledky až na ukazatel sledující celkovou produkci kouře. PP1 vykazovala celkově největší produkci kouře (63,2 m²) oproti všem testovaným polypropylenovým směšem.

Hodnota maximam HRR pro PP1 – 322,5 kW/m²

Hodnota maximam HRR pro PP2 – 268,9 kW/m²

PP3 (25hm% B3+E7, 5hm% F5) a PP4 (35hm% B3+E7)



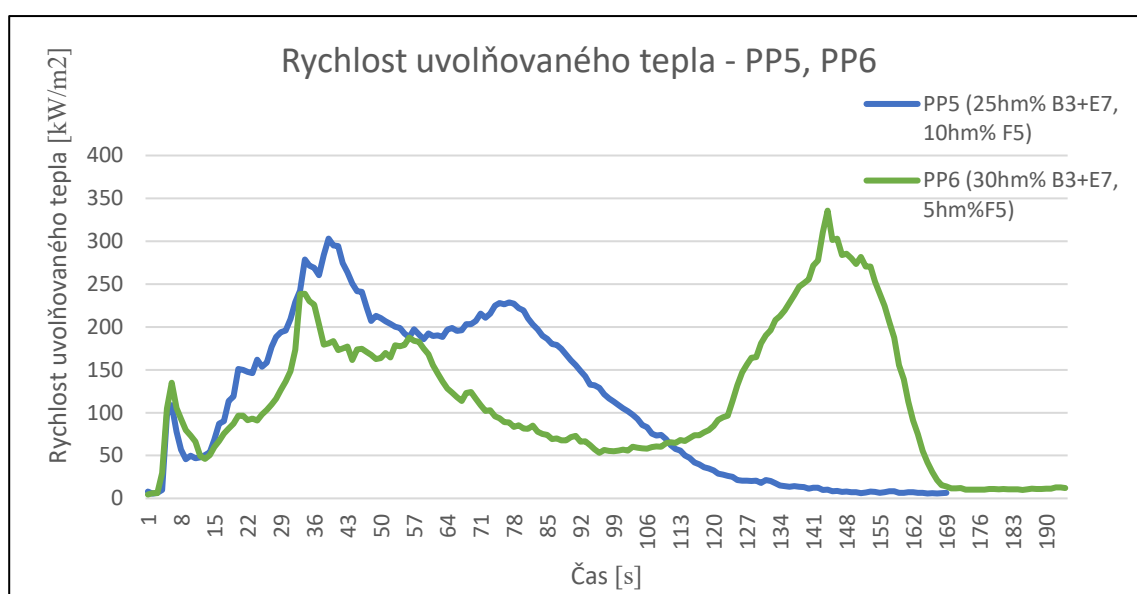
Obrázek 48 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PP 3 a PP4

Z grafu na obrázku 48 je vidět, že vzorek PP4 nevykazuje příliš velké uvolnění tepla. Průměrná hodnota vykazuje pouze $107,9 \text{ kW/m}^2$. Doba testování hořlavosti byla u třetího vzorku nejkratší v porovnání s ostatními vzorky PP modifikovaného retardéry. PP4 v porovnání s ostatními PP směsmi obstál ve zkoušce hořlavosti nejlépe z pohledu HRR a celkové produkce kouře.

Hodnota maximam HRR pro PP3 – $377,8 \text{ kW/m}^2$

Hodnota maximam HRR pro PP4 – $177,7 \text{ kW/m}^2$

PP5 (25hm% B3+E7, 10hm% F5) a PP6 (30hm% B3+E7, 5hm%F5)

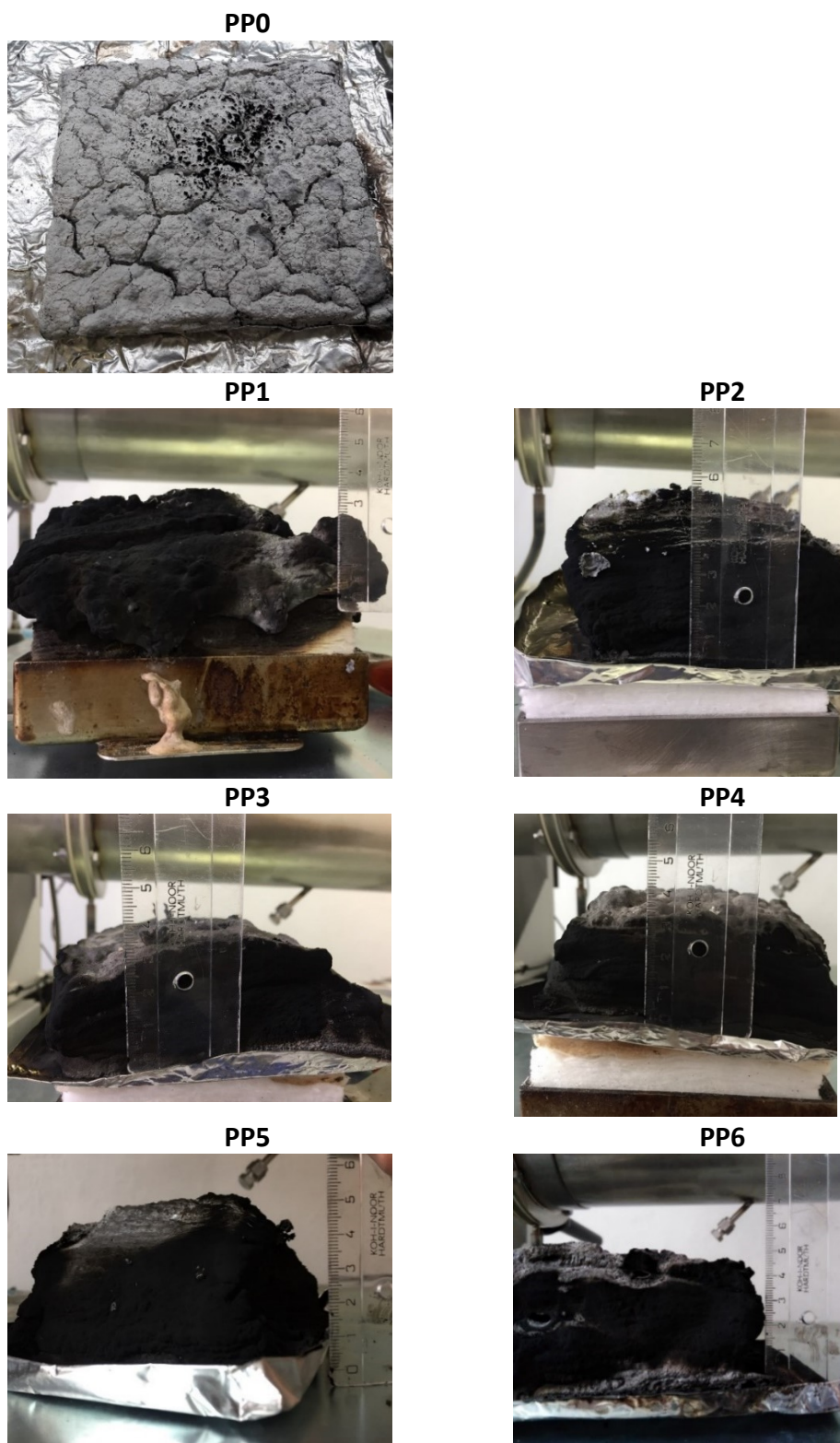


Obrázek 49 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PP5 a PP6

Průměrná hodnota HRR u vzorků PP5 a PP6 a celková produkce kouře vychází v podobných číslech. U PP5 došlo k nižší hodnotám hmotnostního úbytku.

Hodnota maximam HRR pro PP5 – $303,1 \text{ kW/m}^2$

Hodnota maximam HRR pro PP6 – $335,7 \text{ kW/m}^2$

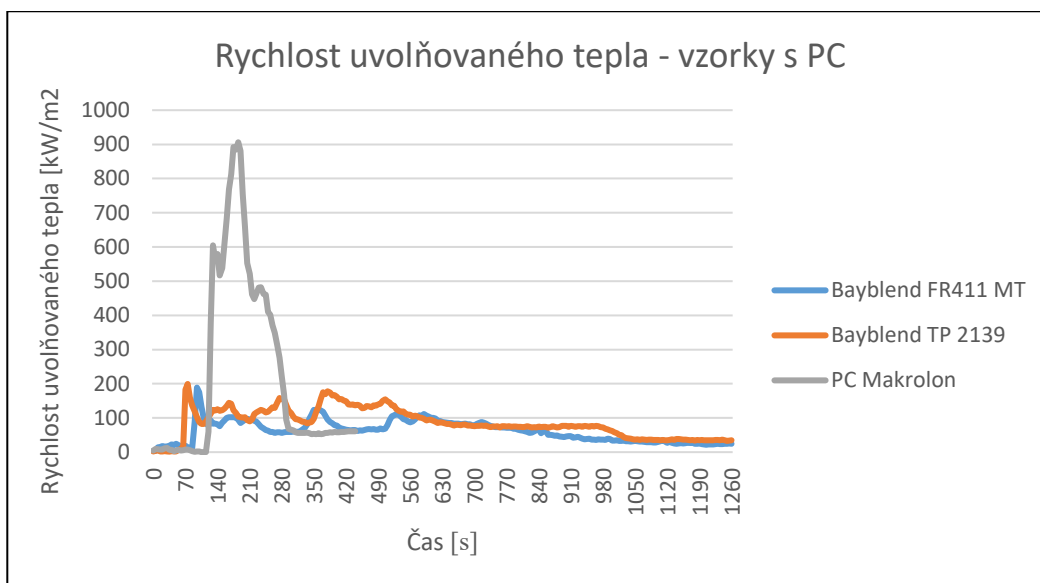


Obrázek 50 Karbonizované polypropylenové vzorky

Tabulka 23 Výsledky zkoušky hořlavosti pro směsi PC

Vzorek	Průměrná rychlost uvolňování tepla [KW/m ²]	Celková produkce kouře [m ²]	Celkový únik tepla [MJ/m ²]	Hmotnostní ztráta[g]	Doba hoření vzorku[s]
Bayblend FR411 MT	50,0	21,4	90,5	61,6	1890,0
Bayblend TP 2139	85,3	20,6	107,4	72,6	1260,0
PC Makrolon	309,4	41,0	97,4	80,0	440,0

Výsledky PC směsí odpovídaly očekávaným výsledkům v porovnání s materiálovými listy. Pro srovnání hodnot byl vybrán čistý PC, který vykazoval ve všech parametrech nejvyšší hodnoty. Porovnání výsledků komerčních vzorků jsou uvedena v tabulce (tab. 23).



Obrázek 51 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků s polykarbonátem

U měření vzorku polykarbonátu bez retardérů hoření byla překvapivá doba, než se vzorek vznítí. Jednalo se téměř o dvě minuty, než jiskrný iniciátor zapálil vzorek. Následující průběh hoření byl očekávaný a výsledná hodnota průměrné rychlosti uvolňovaného tepla byla 309,4 kW/m². Doba hoření byla přibližně 7,3 minuty. Z obrázku 52, který zobrazuje stav vzorků po hoření, je patrné, že bez přídavku retardéru hoření byl úbytek hmotnosti po

zkoušce výrazně velký. U komerčních směsí bylo očekáváno dosažení nízkých hodnot. Obě komerční směsi PC vykazovaly podobné hodnoty. Avšak směs Bayblend FR411 MT disponovala lepšími hodnotami v hodnocení HRR.

Hodnota maximální HRR pro Bayblend FR411 MT – 187,8 kW/m²

Hodnota maximální HRR pro Bayblend TP 2139 – 193,3 kW/m²

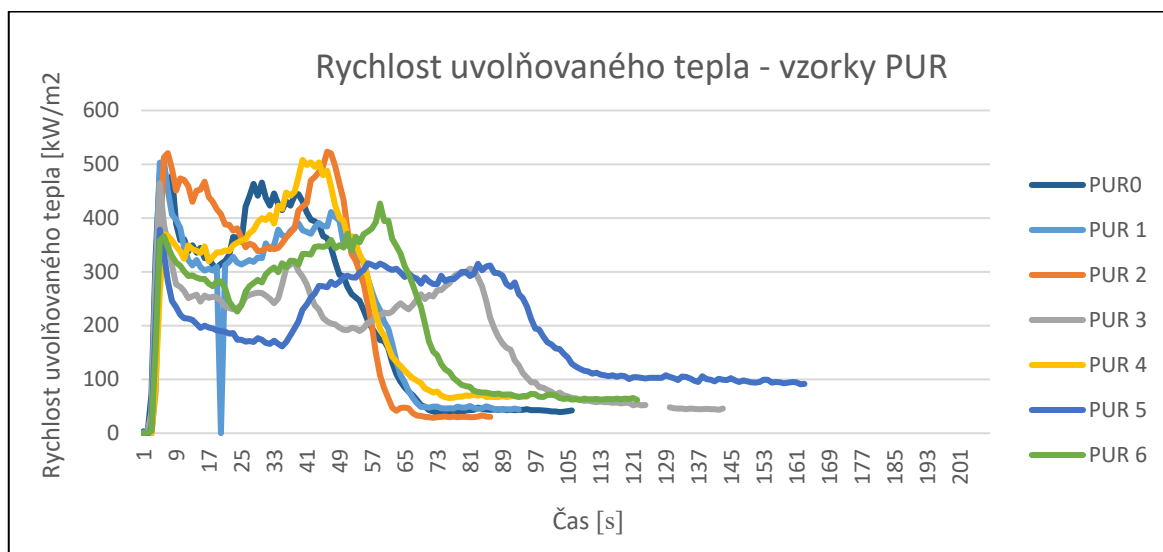
Hodnota maximální HRR pro PC Makrolon – 906,1 kW/m²



Obrázek 52 Zkarbonizované polykarbonátové vzorky

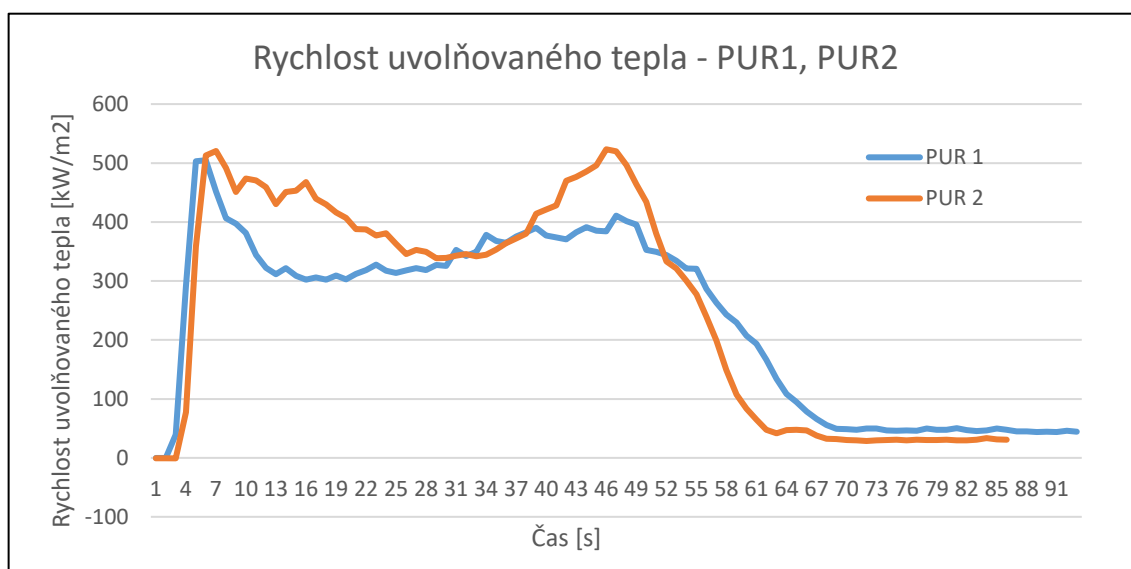
Tabulka 24 Výsledky zkoušky hořlavosti pro směsi PUR

Vzorek	Průměrná rychlost uvolňování tepla [KW/m ²]	Celková produkce kouře [m ²]	Celkový únik tepla [MJ/m ²]	Hmotnostní ztráta [%]	Doba hoření vzorku[s]
PUR0	219,3	27,6	112,8	86,1	525,0
PUR1 (10hm% E4)	240,9	44,3	108,0	81,1	460,0
PUR2 (20hm% E4)	277,0	51,5	112,2	78,2	425,0
PUR3 (10hm% E4, 10hm% F5)	137,7	119,6	170,2	75,1	710,0
PUR4 (30hm% E4)	262,8	50,7	119,1	74,1	470,0
PUR5 (20hm% E4, 10hm% F5)	170,9	40,6	174,9	72,2	1035,0
PUR6 (10hm% E4, 20hm% F5)	211,1	32,4	124,8	72,0	605,0



Obrázek 53 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků PUR

PUR1 (10hm% E4) a PUR2 (20hm% E4)

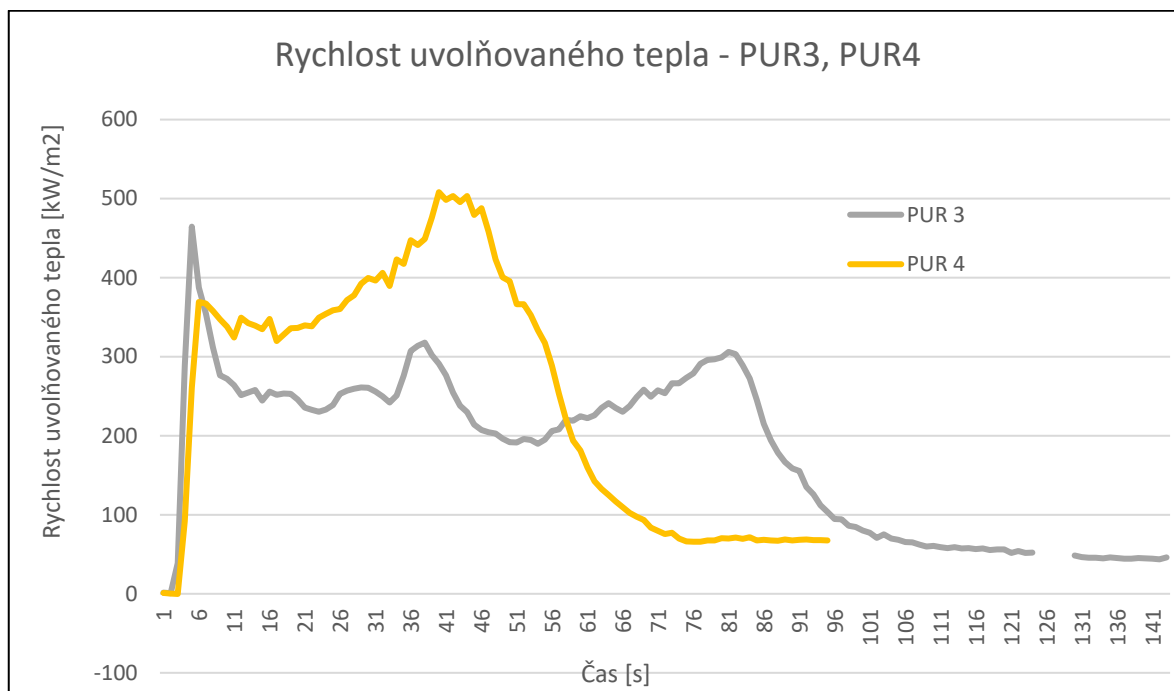


Obrázek 54 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků PUR1 a PUR2

PUR1 a PUR2 vykazují podobný časový průběh závislosti HRR na čase. I maximální hodnoty jsou řádově stejné. Vzorky se lišily při porovnání ohořelých zbytků. Vzorek PUR1 měl mnohem hladší strukturu povrchu oproti PUR2, na kterém se vytvořily krátery.

Hodnota maximam HRR pro PUR1 – 504,8 kW/m²

Hodnota maximam HRR pro PUR2 – 523,3 kW/m²

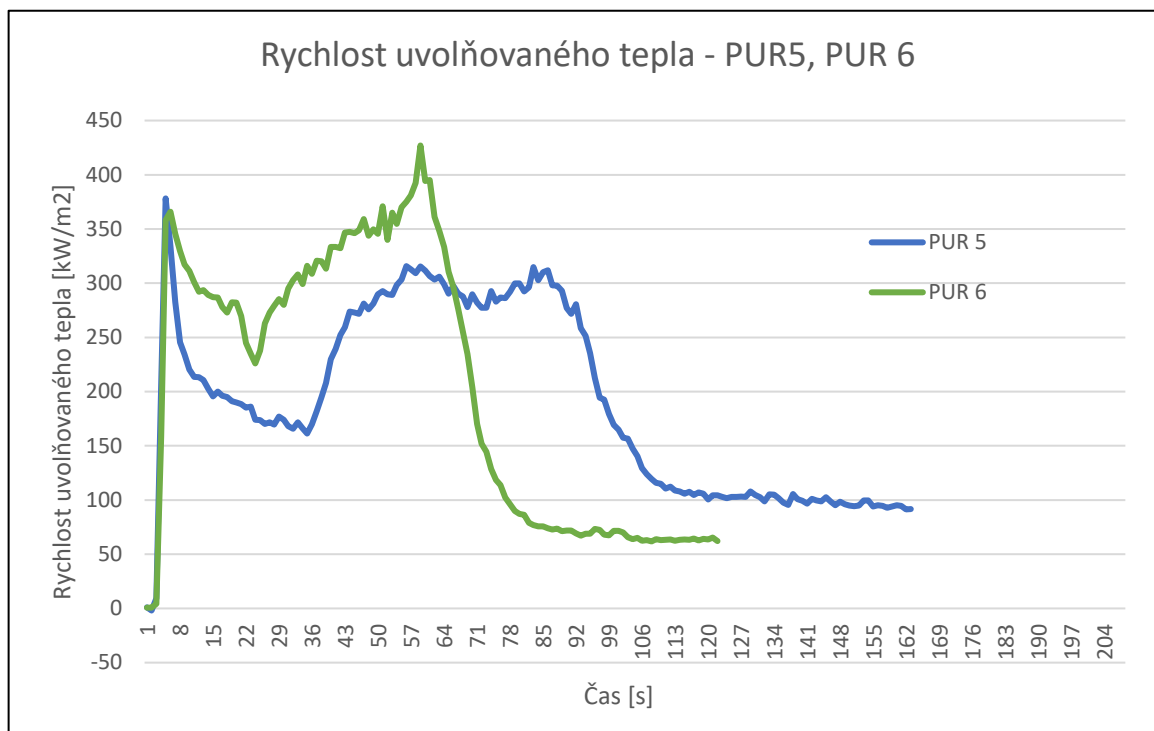
PUR3 (10hm% E4, 10hm% F5) a PUR4 (30hm% E4)

Obrázek 55 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PUR3 a PUR4

Vzorek PUR3 vykazovala nejmenší průměrnou hodnotu HRR v porováním se ostatními PUR směsmi. Nicméně disponovala největší hodnotou v parametru celkové produkce kouře. Opět se vzorky lišily po vizuální stránce ohořelého zbytku. Směs PUR3 měla hladký, lesklý, napěněný zkarbonizovaný povrch. Směs PUR4 měla povrch puchýřovitý. Lze si všimnout i lepší struktury napěnění u vzorku PUR3 oproti PUR4.

Hodnota maximam HRR pro PUR3 – 464,5 kW/m²

Hodnota maximam HRR pro PUR4 – 508,2 kW/m²

PUR5 (20hm% E4, 10hm% F5) a PUR6 (10hm% E4, 20hm% F5)

Obrázek 56 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PUR5 a PUR6

Směs PUR5 vykazovala menší průměrnou HRR, ale s vyšší produkcí kouře oproti směsi PUR6. Opět je zde možno vidět velké rozdíly v ohořelých zbytcích (obr. 57). V obou vzorcích si lze všimnout napěněné struktury účinkem intumescentního retardéru hoření. Zkarbonizované zbytky se opět liší i v struktuře povrchu, na lesklém povrchu PUR5 se vykytují minimální krátery, povrch PUR6 je hladký. Opět tedy retardéry hoření E4 a F5 ovlivnily povrch ohořelého zbytku.

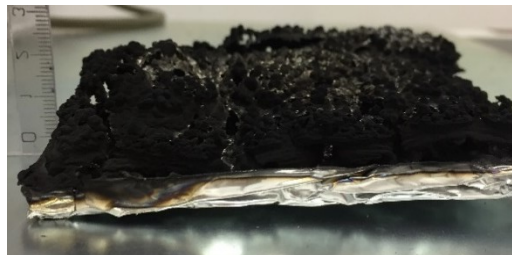
Hodnota maximam HRR pro PUR5 – 378,2 kW/m²

Hodnota maximam HRR pro PUR6 – 427 kW/m²

PUR1



PUR2



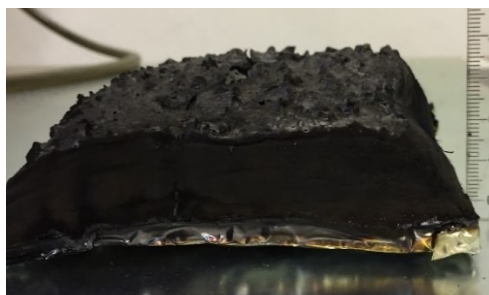
PUR3



PUR4



PUR5



PUR6



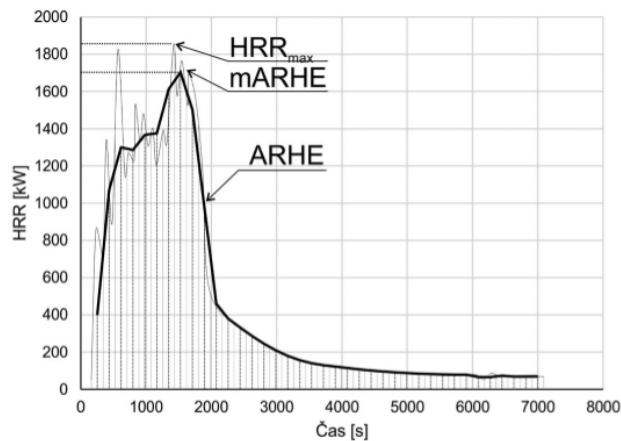
Obrázek 57 Zkarbonizované PUR vzorky

ZÁVĚR

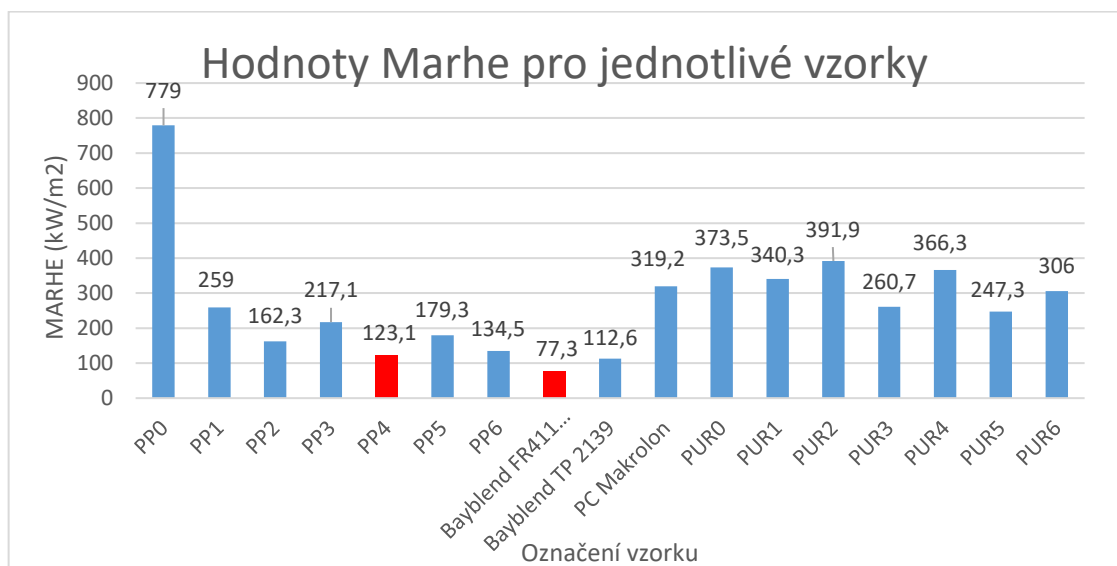
Cílem diplomové práce byl návrh polymerní směsi, do které je zakomponován retardér hoření pro potenciální aplikaci v železniční hromadné dopravě. Tyto polymerní směsi jsou limitovány z hlediska hořlavosti normou EN 45545.

Charakterizace výsledků je v závěru diplomové práce zaměřena dle dosažené hodnoty Marhe, která byla získána z výsledků hořlavostní zkoušky na kónickém kalorimetru.

Na obrázku 58 je graficky zobrazen vztah mezi hodnotou HHR a Marhe. Hodnota Marhe tedy definuje maximální průměrnou rychlost uvolňování tepla ze vzorku při tepelné hustotě toku 50 kW/m^2 . V oblasti normy se vyskytují pouze dvě hodnoty Marhe, které se liší v klasifikaci hladiny nebezpečí v definovaných požadavcích, a to $<90 \text{ kW/m}^2$ a $<60 \text{ kW/m}^2$.



Obrázek 58 Grafické znázornění vztahu hodnot HRR_{max} a Marhe [66]



Obrázek 59 Naměření hodnoty MARHE pro všechny vzorky polymerních materiálů

Nejlepší výsledek byl dosažen ve vzorku směsi PP4, kde hodnota Marhe dosahovala $123,1 \text{ kW/m}^2$. Vzorek směsi byl tvořen z 65hm% PP a 35hm% směsí retardérů hoření B3 a E7. Bohužel se nepodařilo dosáhnout výsledku hodnoty Marhe pod limit 90 v navrhovaných polymerních směsích, které by upřesnily možnou aplikaci dané polymerní směsi v kolejovém vozidle. Druhý nejlepší výsledek hodnoty Marhe $134,5 \text{ kW/m}^2$ byl dosažen u vzorku PP6, který je tvořen také z 65hm% PP, 30hm% B3 + E7 a 5hm% retardéru F5. Tento výsledek poukazuje na skutečnost, že obě směsi byly plněny z 35hm% retardéry hoření, což se pro výsledky hodnot Marhe ukázalo jako nejlepší procentuální složení.

Vhodný výsledek byl naměřen na komerční polykarbonátové směsi Bayblend TP 2139, který dosahoval hodnoty $77,3 \text{ kW/m}^2$. Tato komerční směs by byla vhodná pro aplikace například sedadel v požadavku R6 s hodnotami Marhe $<90 \text{ kW/m}^2$ v HL1 nebo HL2.

Hodnoty Marhe polyuretanových směsí nevyhovují z pohledu limitů hodnot Marhe $<90 \text{ kW/m}^2$. Nejnižší hodnotou disponovala PUR5 $247,3 \text{ kW/m}^2$, která byla plněna 30hm%, 20hm% E4 a 10hm% F5.

Při plnění retardéry hoření dochází k modifikaci mechanických vlastností. Výsledky tahových zkoušek tento předpoklad potvrdily v hodnotách modulu pružnosti a napětí v mezi kluzu u vzorků směsí s polypropylenem. U těchto parametrů se jednalo o snížení hodnot oproti čistému PP. Při testování komerčních materiálů z pohledu tahových zkoušek se znamenalo, že disponují větší hodnotou tuhosti oproti čistému PC. V parametru tažnosti v mezi kluzu naopak vykazovaly komerční směsi menší hodnotu v porovnání s nemoifikovaným polykarbonátem.

Při testování rázové houževnatosti se dospělo k závěru, že plnění polypropylenu retardéry hoření má výrazný vliv, jelikož se výsledky hodnot zmíněného parametru u vzorků modifikovaných retardéry hoření až devítinásobně snížili. Při pozorování výsledků vrubové houževnatosti bylo opět potvrzeno, že modifikované vzorky směsí disponují menšími hodnotami v porovnání s čistým polykarbonátem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Wanberg, J., Composite Materials Fabrication Handbook 2, Stillwater: Wolfgang Publications Inc., 2010, 144 p, ISBN 978-1-929133-93-2
- [2] Ehrenstein, G. W., Polymerní kompozitní materiály, Praha: Nakladatelství SCIENTIA, 2009, 350 s, ISBN 978-80-86960-29-6
- [3] Kompozity [online] dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/> [cit. 24.04.2019]
- [4] Jančář, J., Úvod do Materiálového Inženýrství Polymerních Kompozitů, Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003, 194 s, ISBN 80-214-2443-5
- [5] Cloud, G. L., Patterson, E., Backman D., Dynaminc Behavior of Materials, Volume 1: Proceedings of the 2017 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Springer, 2017, 245 p, ISBN 978-3-319-62956-8
- [6] Kratochvíl, B., Švorčík, V., Vojtěch, D., Úvod do studia materiálů, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 190 s, ISBN 807080-568-4
- [7] Military Handbook-MIL-HDBK-17-1F: Composite Materials Handbook, Volume 1-Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials, U.S. Department of Defense, 2002, 586 p, ISBN 978-1-59124-509-4
- [8] Donaldson, S. L., Miracle, D. B., ASM Handbook Volume 21: Composites, Volume 21, Ohio: ASM International, 2001, 1201 p, ISBN 9780871707031
- [9] Dostal, C.A., Engineered Materials Handbook: Composites, Volume 1, Ohio: ASM International, 1987, 983 p, ISBN 978-0871702791
- [10] Bitzer, T. N., Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing, London: Chapman & Hall, 1997, 233 p, ISBN 978-94-011-5856-5
- [11] Polymer Composite Manufacturing Using a Pultrusion Process: a Review [online] dostupné z: <http://thescipub.com/pdf/10.3844/ajassp.2014.1798.1810> [cit. 24.04.2019]
- [12] Machek, V., Polymery a kompozity s polymerní maticí, Praha, česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008, 86 p., ISBN 987-80-01-03927
- [13] ASM International, Engineered Materials Handbook: Ceramics and Glasses, USA, CRS Press, 1991, 1217 p, ISBN: 978-0871702821

- [14] Vilčáková, J., Polymerní kompozity přírodní a syntetické, přednášky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, 2017
- [15] Starý, M., Pohl, I., Kašík, B., Štekner., B., Terpolymery ABS, Praha: SNTL, 1977, 248 s
- [16] Kindratech, Pipes Sdn Bhd. KINDRATECH® ABS [online] dostupné z <http://kindratech.kindraco.com/home/products/abs-pipes> [cit. 11. 3. 2019]
- [17] Davis, J. R., ASM International, Handbook of Materials for Medical Devices. Ohio, ASM International, 2003, 341 p, ISBN-13 9780871707901
- [18] Wanberg, J., Composite Materials, Wolfgang Publications, Stillwater, 2013, 144 p, ISBN 9781935828662
- [19] Karlsson, K. F., Tomasastrom, B., Manufacturing and Applications of Structural Sandwich Components, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1997, Vol. 28, No. 2, pp. 97-111, ISSN 1359-835X
- [20] Vaňková, M., Měření kríповých vlastností polymerních kompozitů se skleněnou výztuží připravených technologií pultruze, diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Technologická fakulta, 2011
- [21] Casemodding: Kompozitní zázrak - laminát [online] dostupné z http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-modding/12243-casemoddingkompozitni_zazrak-laminat [cit. 2019-04-22]
- [22] NF F01-281, Railway rolling stock-Parts in fibre-reinforced thermosetting composites, French standard, 1989
- [23] Hudson, C. W., Carruthers, J. J., Robinson, A. M., Multiple Objective Optimization of Composite Sandwich Structures for Rail Vehicle Floor Panels, Composite Structures, 2010, Vol. 92, No. 9, pp. 2077-2082, ISSN 0263-8223
- [24] Belingardi G., Cavatorta M. P., Duella R., Material Characterization Of A Composite-Foam Sandwich For The Front Structure Of A High Speed Train, Composite Structures, 2003, Vol. 61, pp. 13-25, ISSN 0263-8223
- [25] Ning, H., Vaidya, U., Janowski, G. M., Husman, G., Design, Manufacture And Analysis Of A Thermoplastic Composite Frame Structure For Mass Transit, Composite Structures, 2007, Vol. 80, No. 1, pp. 105-116, ISSN 02638223

- [26] Ning, H., Janowski, G. M., Vaidya, U., Husman, G., Thermoplastic Sandwich Structure Design and Manufacturing for the Body Panel of Mass Transit Vehicle, *Composite Structures*, 2007, Vol. 80, No. 1, pp. 82-91, ISSN 0263-8223
- [27] Ning, H., Pillay, S., Vaidya, U., Design and Development of Thermoplastic Composite Roof Door For Mass Transit Bus, *Materials & Design*, 2009, Vol. 30, No. 4, pp. 983-991, ISSN 0261-3069
- [28] Lehmus D., Busse M., Herrmann A., Kayvantash K., *Structural Materials and Processes in Transportation*, New York: WileyVCH Verlag GmbH, 2013, 598 p, ISBN: 978-3527327874
- [29] Gougl, S., *Composite Structures & Construction : Modern Methods in Wet Lay-Up & Prepreg Construction for Aerospace / Automotive / Marine Applications*, , UK, 134 p, ISBN13 9781974107384
- [30] Pultruze [online] dostupné z <http://fibrolux.com/cs/main/knowledge/pultruze/> [cit. 09.04.2019]
- [31] Sabu, T., Kuruvilla J., Malhotra, S. K., Sreekala, M. S., *Polymer Composites: 3 Volume Set*, , Weinheim, 2013, 1744 p, ISBN 9783527329854
- [32] Starr, T., *Pultrusion for Engineers*, Boca Raton: CRC Press, 2000, 303 p, ISBN 08493-0843-7
- [33] Raju, D. S., Loos, A. C., *Processing of Composites*. United States: Hanser Publishers, 2000, 488 p, ISBN 3446180443
- [34] Campbell, F., *Structural Composite Materials*, Ohio: ASM International, 2010, 612 p, ISBN 978-161-5031-405
- [35] Mazumdar S. K., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, Boca Raton: CRC Press, 2002, 392 p, ISBN 08-493-0585-3
- [36] Ashby, M., Jones, D. R., *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures and Processing*, London, Butterwortg-Heinemann, 2013, 576 p, ISBN 9780080966687
- [37] PC/ABS-polykarbonát/akrylonitril-butadién-styrén [online] dostupné z <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pc-abs.html> [cit. 08.04.2019]

- [38] Polykarbonát+ABS-blend (PC+ABS) [online] dostupné z <http://www.lpm.cz/cgi-bin/riweta.cgi?nr=2271&lng=1> [cit. 16.04.2019]
- [39] Bayblend® (PC+ABS blend; PC+ASA blend) product description [online] dostupné z <http://www.plastics.covestro.com/en/Products/Bayblend> [cit. 16.03.2019]
- [40] Yang, Y., Chen X., Ningyun L., Gao F, Injection Molding Process Control, Monitoring, and Optimization, Munich: Hanser Publishers, 2016, ISBN 978-1-56990-592-0
- [41] Biron, M., Thermoplastics and Thermoplastic Composite, Waltham, MA: William Andrew, 2013, 1064 p., ISBN 978-1-4557-7898-0
- [42] Qin, Y., Micro-Manufacturing Engineering and Technology, Amsterdam, Elsevier, 2010, pp. 337-393, ISBN 978-0-81-551545-6
- [43] PC Polykarbonát [online] dostupný z <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pc.html> [cit. 28.02.2019]
- [44] Sova, M., Termoplasty v praxi, Praha, Dashöfer, 1999. 253 s, ISBN 80-8622915-7
- [46] Laoutid, F. et al., New Prospects in Flame Retardant Polymer Materials: From Fundamentals to Nanocomposites, Materials Science and Engineering: R: Reports, 2009, Vol. 63, No. 3, pp. 100-125, DOI 10.1016/j.mser.2008.09.002
- [47] Tolinski, M., Additives for Polyolefins: Getting the Most Out of Polypropylene, Polyethylene and TPO, Londo, Elsevier, 2015, ISBN 978-032-3358-842
- [48] Edward, D. W., Levchik, S. V., Flame Retardants for Plastics and Textiles Practical Applications, Munich, Hanser Publisher, 2016, 359 p, ISBN 978-15231-0128-3
- [49] Langerová, J., Vliv přísad retardérů hoření na výsledné vlastnosti polymerů, diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2009
- [50] Scanning Electron Microscopy (SEM). Science Education Resource Center at Carleton College [online] dostupné z http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html [cit. 10.04.2019]
- [51] Elektronová mikroskopie pro biology [online] dostupné z <http://triton.paru.cas.cz/old-lem/book/Podkap/7.1.html> [cit. 08.03.2019]
- [52] Navrátilová, J., Makromolekulární chemie II., přednášky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, 2018

- [53] ČSN EN ISO 179-1, Plasty–Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška, 2001, Praha, Český normalizační institut
- [54] ČSN EN ISO 527-2, Plasty–Stanovení tahových vlastností–Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty, UNMZ, 2012
- [55] Pavlínek, V., Kontrolní a zkušební metody, přednášky, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín, 2015
- [56] Rotheron, R. N., Particulate-Filled Polymer Composites, Smithers Rapra Press, USA, 2013, 556 p, ISBN 978-1859573822
- [57] U.S. Environmental Protection Agency: Furniture flame retardancy partnership [online] dostupné z <http://www.epa.gov/dfe/pubs/flameret/altrep-v1/altrepv1f1c.pdf> [cit. 16.04.2019]
- [58] KM-systém [online] dostupné z <https://km-system.sk/vstrekovacie-stroje/elektricke/mitsubishi-180-met3/> [cit. 18.02.2019]
- [59] Thermoplastic composites for mass transit applications [online] dostupné z <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/thermoplastic-composites-mass-transit-applications> [cit. 19.03.2019]
- [60] Sain, N., Park, S.H., Suhara, F., Law, S., Flame Retardant and Mechanical Properties of Natural Fibre-PP Composites Containing Magnesium Hydroxide, Polymer Degradation and Stability, Vol. 83, No. 2, 2004, pp. 363-367, DOI: 10.1016/S0141-3910(03)00280-5
- [61] Skřivan, M., Bezhalogenové nehořlavé kabely [online] dostupný z http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23805 [cit. 25.04.2019]
- [62] ČSN EN 45545-1, Drážní aplikace-Protipožární ochrana drážních vozidel, Část 1: Obecně. Praha: Český normalizační institut, 2013
- [63] ČSN EN 45545-1, Drážní aplikace-Protipožární ochrana drážních vozidel, Část 2: Požadavky na požární vlastnosti materiálů a součástí. Praha: Český normalizační institut, 2016
- [64] Předpis č. 118 Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK/OSN) – Jednotná technická ustanovení týkající se vlastností materiálů používaných

ve vnitřní konstrukci určitých kategorií motorových vozidel při hoření. Lucembursko: Úřad pro publikace Evropské unie, 2010

[65] Reaction-To-Fire Tests-Heat Release, Smoke Production and Mass Loss Rate - Part 1: Heat Release Rate (Cone Calorimeter Method). Geneva: ISO, 2012

[65] Rychlost uvolňování tepla jako parametr pro hodnocení chování materiálů při požáru [online] dostupné z https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/rychlost-uvolnovani-tepla-jakoparametr-pro-hodnoceni-chovani-materialu-pri-pozaru_42776.html [cit. 03.04.2019]

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ABS Akrylonitrilbutadienstyren

PC Polykarbonát

PP Polypropylen

Ca Vápník

Si Křemík

O Kyslík

B Bór

Na Sodík

Fe Železo

EP Epoxidová pryskyřice

UP Polyesterová pryskyřice

VE Vinylesterová pryskyřice

PR Fenolická pryskyřice

PE Polyetylen

PPS Polyfenylsulfid

PEEK Polyéteréterketon

PEKK Polyéterketonketon

T_g Teplota skelného přechodu

T_f Teplota plastického toku

T_m Teplota tání

PVC Polyvinylchlorid

PUR Polyuretan

Al Hliník

K Draslík

Mg Hořčík

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 Rozdělení kompozitních materiálů [3]</i>	12
<i>Obrázek 2 Rozdělení kompozitů podle geometrického tvaru výztuže a) částicový, b) s krátkými vlákny, c) s dlouhými vlákny s tkaninou v jednom směru, d) s dlouhými vlákny s tkaninou ve více směrech [6]</i>	13
<i>Obrázek 3 Vliv jednotlivých složek ABS na vlastnosti, strukturní vzorce akrylonitrilu, 1, 3-butadienu, styrenu [16]</i>	17
<i>Obrázek 4 Strukturní vzorec polykarbonátu [44]</i>	17
<i>Obrázek 5 Strukturní vzorec PP [17]</i>	18
<i>Obrázek 6 Schéma RTM procesu [35]</i>	19
<i>Obrázek 7 Zadní kompozitní kryt světel</i>	19
<i>Obrázek 8 Výrobní linka pultruzních profilů [30]</i>	20
<i>Obrázek 9 Pultruzní profily jako zavazadlové koše v autobusech</i>	21
<i>Obrázek 10 Schéma vstřikovacího stroje [40]</i>	22
<i>Obrázek 11 Pozitivní a negativní tvarování [36]</i>	23
<i>Obrázek 12 Přístrojová deska z ABS v kabině řidiče</i>	23
<i>Obrázek 13 Boční kryt z ABS/PC podél čelního skla v prostoru dveří v autobusu</i>	23
<i>Obrázek 14 Ukázka modelace sedadla do autobusu z polypropylenu vyztuženého skleněnými vlákny [59]</i>	25
<i>Obrázek 15 Aplikace skleněné vlákna/PP [59]</i>	25
<i>Obrázek 16 Inovace podlah v interiéru autobusu a) ocelová konstrukce s překližkou, b) panel z PP vyztužený skleněnými vlákny, c) tvarový detail podlahového panelu [59]</i>	26
<i>Obrázek 17 Konvenční autobusová konstrukce s ocelovými rámy, b) montáž konstrukčního rámu na panely karoserie [59]</i>	26
<i>Obrázek 18 Ukázka podpůrné konstrukce pultruzních profilů v interiéru autobusů</i> ..	27
<i>Obrázek 19 Kompozitní materiál používaný pro aplikace podlah v autobusech</i>	27
<i>Obrázek 20 Obrázek 21 Příklady kolejových vozidel s kompozitními panely</i>	28
<i>Obrázek 22 Laboratorní hnětič Brabender</i>	40
<i>Obrázek 23 Obrázek 24 Vakuová míchačka s příslušenstvím</i>	40
<i>Obrázek 25 Mechanický lis s topnými deskami</i>	41
<i>Obrázek 26 Vstřikovací stroj značky Mitsubishi 180 MET3 [58]</i>	42
<i>Obrázek 27 Použitá vstřikovací forma</i>	42

Obrázek 28 Schéma rastrovacího elektronového mikroskopu [51]	44
Obrázek 29 SEM fotografie retardérů hoření B3 a E7 při 10 kV, a) zvětšení 1 000x, b) zvětšení 5 000x.....	44
Obrázek 30 SEM fotografie retardéru hoření F5	46
Obrázek 31 SEM fotografie retardéru hoření E4	47
Obrázek 32 Ukázka tahové křivky [55]	49
Obrázek 33 Tahové křivky vzorků PP1	50
Obrázek 34 Tahové křivky vzorků PP2	51
Obrázek 35 Tahové křivky vzorků PP3	52
Obrázek 36 Tahové křivky vzorků PP4	53
Obrázek 37 Tahové křivky vzorků PP5	54
Obrázek 38 Tahové křivky vzorků PP6	55
Obrázek 39 Tahové křivky vzorků PC Makrolon	56
Obrázek 40 Tahové křivky vzorků Bayblend TP 2139	57
Obrázek 41 Tahové křivky vzorků Bayblend FR411 MT	58
Obrázek 42 Přístroj na vyražení vrubu do zkušebního tělíska	59
Obrázek 43 Porovnání průměrných hodnot rázové houževnatosti pro PP vzorky	60
Obrázek 44 Porovnání rázové a vrubové houževnatosti a_k pro PC vzorky	62
Obrázek 45 Kónický kalorimetr, ukázka vzorku PC	63
Obrázek 46 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PP	65
Obrázek 47 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PP1 a PP2	66
Obrázek 48 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PP 3 a PP4	67
Obrázek 49 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PP5 a PP6	67
Obrázek 50 Karbonizované polypropylenové vzorky	68
Obrázek 51 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků s polykarbonátem	69
Obrázek 52 Zkarbonizované polykarbonátové vzorky	70
Obrázek 53 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků PUR	71

Obrázek 54 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků PUR1 a PUR2	71
Obrázek 55 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PUR3 a PUR4	72
Obrázek 56 Rychlostní průběhy uvolňování hustoty tepelného toku v závislosti na čase u vzorků směsí PUR5 a PUR6	73
Obrázek 57 Zkarbonizované PUR vzorky	74
Obrázek 58 Grafické znázornění vztahu hodnot HRR_{max} a Marhe [66]	75
Obrázek 59 Naměření hodnoty MARHE pro všechny vzorky polymerních materiálů	75

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Vybrané vlastnosti výztužných vláken.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 2 Složení směsi s polypropylenovou polymerní matricí.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 3 Složení směsi s polyuretanovou polymerní matricí</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 4 Technologické parametry vstřikovacího stroje.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 5 Prvková analýza EDX směsi retardérů B3 a E7.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 6 Prvková analýza EDX retardéru hoření F5.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 7 Prvková analýza EDX retardéru hoření E4.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 8 Tahové vlastnosti vzorku PP1.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 9 Tahové vlastnosti vzorku PP2.....</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 10 Tahové vlastnosti vzorku PP3.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 11 Tahové vlastnosti vzorku PP4.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 12 Tahové vlastnosti vzorků PP5.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 13 Tahové vlastnosti vzorku PP6.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 14 Shrnutí průměrných hodnot parametrů pro vzorky PP</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 15 Tahové vlastnosti – PC Makrolon</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 16 Tahové vlastnosti vzorku Bayblend TP 2139.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 17 Tahové vlastnosti vzorků Bayblend FR411 MT.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 18 Shrnutí průměrných hodnot parametrů pro vzorky PC materiálů.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 19 Výsledky měření rázové houževnatosti pro PP vzorky</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 20 Výsledky měření rázové houževnatosti pro PC vzorky</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 21 Výsledky měření vrubové houževnatosti pro PC vzorky</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 22 Výsledky zkoušky hořlavosti pro vzorky PP.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 23 Výsledky zkoušky hořlavosti pro směsi PC.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 24 Výsledky zkoušky hořlavosti pro směsi PUR</i>	<i>70</i>

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: Ukázka reportu z hořlavostní zkoušky pomocí kónického kalorimetru

PŘÍLOHA P I: UKÁZKA REPORTU Z HOŘLAVOSTNÍ ZKOUŠKY POMOCÍ KÓNICKÉHO KALORIMETRU

Report produced with the Fire Testing Technology ConeCalc v6.5a software

page 1

Cone Calorimeter Test Report

Laboratory name
Operator Srnec
Filename C:\CC5\Data\Jana\PC TP.CSV
Report name
Sample description PC TP
Material name/ID PC TP

Specimen information

E	13.1 MJ/kg	Specimen number		Conditioned?	No
Thickness	4 mm	Nominal duct flow rate	24 l/s	Temperature	N/A
Initial mass	62.92 g	Edge frame used?	No	RH	N/A
Surface area	100 cm ²	Grid used?	No		
Heat flux	50 kW/m ²	Manufacturer			
Separation	25 mm	Sponsor			
Orientation	Horizontal				

Test

Standard used ISO 5660-1
Date of test 02/05/2019
Time of test 09:29:51
Date of report 02/05/2019

Pre-test conditions

Ambient temperature 20°C
Ambient pressure 98.299 kPa
Relative humidity 50%

Test times

Time to ignition not recorded
Time to flameout 1144 s
End of test criterion ISO 5660-1:2002
End of test time 1260 s
(for calculations)

Apparatus specifications

C-factor 0.03994
Duct diameter 0.114 m
O₂ delay time 15 s
CO₂ delay time 15 s
CO delay time 15 s
OD corr. factor 1.0000

Test conditions

Baseline ambient oxygen 20.701%
Baseline oxygen 20.951%
Baseline carbon dioxide 0.0481%
Mass at sustained flaming no ignition
Time to 70% mass loss 825 s

Heat Release Results

THR (0-300) 28.71 MJ/m²
THR (0-600) 67.06 MJ/m²
THR (0-1200) 105.36 MJ/m²
Fuel load 17.08 MJ/kg

Test results (between 0 and 1260 s)

		Mean	Peak	at time (s)	
Total heat release	107.4 MJ/m ²	Heat release rate (kW/m ²)	85.27	199.33	75
Total oxygen consumed	77.5 g	Effective heat of comb. (MJ/kg)	23.91	79.88	1210
Mass lost	4494.2 g/m ²	Mass loss rate (g/(s·m ²))	3.56	48.30	550
Av. specific MLR ($\dot{m}''_{A,10-90}$)	4.31 g/(s·m ²)	Specific extinction area (m ² /kg)	458.79	3557.53	525
Total smoke release	2064.0 m ² /m ²	Carbon monoxide yield (kg/kg)	0.0138	0.1148	1210
Total smoke production	20.6 m ²	Carbon dioxide yield (kg/kg)	1.67	17.66	525
MARHE	112.6 kW/m ²				

Test averages

between time 0 min and...	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min	6 min	0 s - 0 s	0 s - 1260 s
Heat release rate (kW/m ²)	3.34	56.31	79.34	86.10	95.71	95.94	0.00	85.27
Effective heat of comb. (MJ/kg)	-3.88	26.41	24.29	23.87	23.68	23.62	0.00	23.91
Mass loss rate (g/(s·m ²))	-1.09	2.01	3.19	3.55	3.99	4.03	0.00	3.56
Specific extinction area (m ² /kg)	-231.90	1239.50	980.73	889.17	821.32	785.97	0.00	458.79
Carbon monoxide yield (kg/kg)	0.0001	0.0118	0.0105	0.0104	0.0098	0.0101	0.0000	0.0138
Carbon dioxide yield (kg/kg)	-0.12	1.58	1.50	1.62	1.58	1.68	0.00	1.67

Smoke results

Total smoke release: whole test (0 s - 1260 s) 2064.0 m²/m²

The test results relate to the behaviour of the test specimens of a product under the particular conditions of the test; they are not intended to be the sole criterion for assessing the potential fire hazard of the product in use.

Cone Calorimeter Test Report

Laboratory name

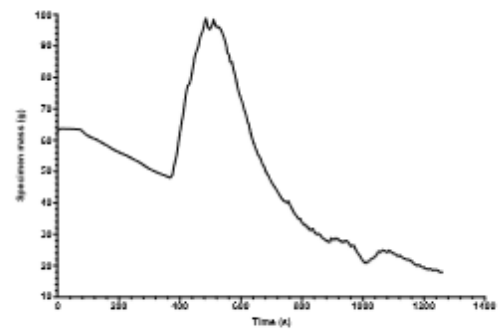
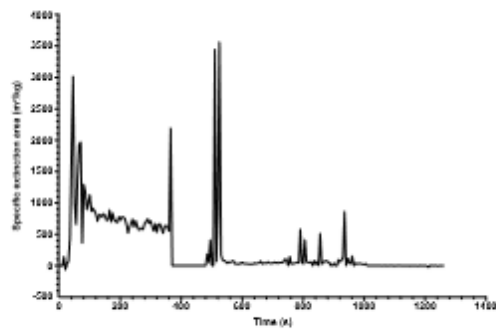
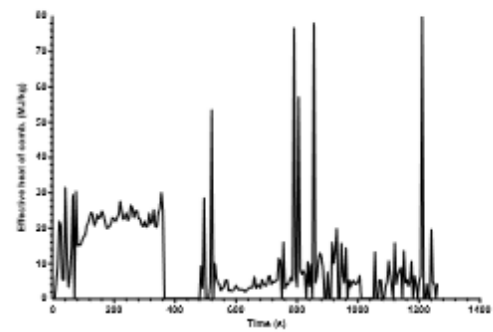
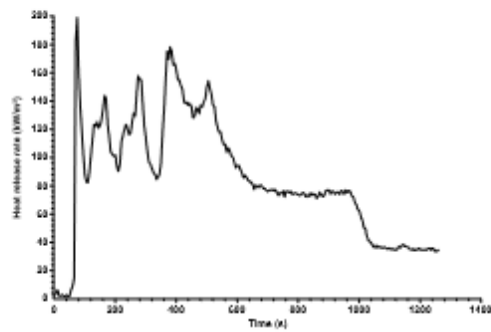
Operator Smeč

Filename C:\CC5\Data\Jana\PC TP.CSV

Report name

Sample description PC TP

Material name/ID PC TP



The test results relate to the behaviour of the test specimens of a product under the particular conditions of the test; they are not intended to be the sole criterion for assessing the potential fire hazard of the product in use.