

Kompozity/nanokompozity s pokročilými vlastnostmi

Bc. Barbora Šafaříková

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů
akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Barbora ŠAFÁŘIKOVÁ
Osobní číslo: T11095
Studijní program: M2808 Chemie a technologie materiálů
Studijní obor: Inženýrství polymerů
Forma studia: prezenční

Téma práce: Kompozity/nanokompozity s pokročilými vlastnostmi

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární řešení v souladu s tématem diplomové práce.
2. Připravte testované polymerní směsi.
3. Charakterizujte materiály z hlediska jejich hořlavosti, mechanických a reologických vlastností.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Wilkie A. Charles, Morgana B. Alexander. *Fire Retardency of Polymeric Materials*, 2nd edition, Boca Raton, USA: 2010, CRC Press, ISBN: 978-1-4200-8399-6.

2. Horrocks A. R., Price D. *Fire retardant materials*, Abington Cambridge, England: 2001, Woodhead Publishing Limited and CRC Press, ISBN: 1 85573 419 2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Alena Kalendová, Ph.D.**

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce: **11. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: *GAFFARIKOVÁ DAŽBOŘA*

Obor: *CHSIP*

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 obhajoby¹⁾;
- 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. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ 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 § 60³⁾ 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 *11.5.2010*

Dažboř

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 nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhlo 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 teč nejmeně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení 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.

¹⁸ 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).

¹⁹ 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). Odmírá-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 výtěžku jim 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 okolnosti až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k výši výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá kompozity/nanokompozity s pokročilými vlastnostmi. Ústředním tématem práce je zejména vliv nanoplňiv na hořlavost. Teoretická část tak seznamuje s pojmy týkající se hořlavosti, retardérů hoření a plniv. Praktická část pak seznamuje s přípravou nanokompozitů a jejich testováním. Polymerní matrice je zastoupena nízkohusotným polyetylenem Bralen RB 2-62 (Slovnaft) a polylaktidem 2003D (NatureWorks). Do polyetyleny byla zamíchána nanoplňiva (Grafmax HC 30, Nanocyl NC7000, OctaIsobutyl POSS, TriSilanolIsobutyl POSS, Dragonite HP, Dragonite koncentrát, Perkalite F100, Pangel S-9) a byly rozvněž zkoumány synergické účinky zmíněných nanoplňiv s běžnými retardéry hoření (ADK STAB[®] FP 2200, Exolite[®] APP 722). Do polylaktidu 2003D byla použita plňiva Nanofil[®] 116 a SE 3010, Garamite[®]1958, řada plňiv Cloisite[®] 10A, 20A, 30B a přírodní Cloisite[®] Na⁺. U připravených kompozitů byl sledován vliv těchto aditiv jednak na hořlavost, tak na mechanické a reologické vlastnosti.

Klíčová slova: nanokompozit, hořlavost, retardér hoření, LDPE, PLA

ABSTRACT

This diploma thesis deals with composites/nanocomposites with advanced features. The central theme of the work is mainly influence the flammability of nanofillers. The theoretical part defines terms related to flammability, flame retardants and fillers. The practical part describes the preparation of nanocomposites and their testing. The polymer matrices are represented by low density polyethylene Bralen RB 2-62 (Slovnaft) and polylactide 2003D (NatureWorks). The polyethylene was mixed with nanofillers Grafmax HC 30, Nanocyl NC7000, OctaIsobutyl POSS, TriSilanolIsobutyl POSS, Dragonite HP, Dragonite koncentrát, Perkalite F100, Pangel S-9, and were examined also synergistic effects of these nanofillers with conventional flame retardants ADK STAB[®] FP 2200, Exolite[®] APP 722. In the case of polylactide 2003D was used nanofillers: Nanofil[®] 116, Nanofil[®] SE 3010, Garamite[®]1958, řada plňiv Cloisite[®] 10A, 20A, 30B a přírodní Cloisite[®] Na⁺. The effect of these additives on flammability, mechanical and rheological properties was tested in prepared composites.

Keywords: nanocomposite, flammability, flame retardant, LDPE, PLA

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především pí. Aleně Kalendové, Ph.D. za veškerou pomoc při vypracování diplomové práce. Současně patří můj dík všem, kteří mi byli nápomocni při měřeních – pí. Jiřina Dohnalová, p. Ing. Miroslav Pastorek, p. Ing. Michal Machovský. Dále bych ráda poděkovala rodičům a příteli za podporu.

Financováno z prostředků programu AKTION Česká republika - Rakousko, spolupráce ve vědě a vzdělávání.



Předložená DP vznikla dále za podpory projektu TIP FR-TI1-188 ve spolupráci s Polymer institutem Brno a s pí. Veronikou Habrovou, Ph.D. Tímto bych jí chtěla poděkovat za milý přístup a cenné rady.

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

Ve Zlíně 12.5.2013

.....

Podpis studenta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 POLYMERY	12
1.1 POLYETHYLEN - PE.....	12
1.1.1 Nízkohustotní polyethylen – LDPE.....	12
1.1.2 Výroba.....	13
1.1.2.1 LDPE v trubkovém reaktoru.....	13
1.1.2.2 Polymerace v autoklávu.....	14
1.1.3 Vlastnosti.....	15
1.1.4 Zpracování a použití.....	15
1.2 POLYLAKTID – PLA.....	16
1.2.1 Výroba.....	16
1.2.1.1 Polykondenzace.....	17
1.2.1.2 ROP – polymerace otevřením kruhu.....	17
1.2.2 Vlastnosti PLA.....	18
1.2.3 Zpracování a použití.....	18
2 PLNIVA	19
3 HOŘLAVOST POLYMERŮ	21
3.1 RETARDÉRY HOŘENÍ.....	22
3.1.1 Halogenové retardéry.....	23
3.1.2 Retardéry obsahující fosfor.....	24
3.2 TESTOVÁNÍ HOŘLAVOSTI.....	24
4 SOUČASNÝ VÝZKUM A VÝVOJ	26
4.1 SROVNÁNÍ EFEKTU MONTMORILLONITU, HYDROXIDU HOŘEČNATÉHO A JEJICH SMĚSI NA HOŘLAVOST A MECHANISMUS TVORBY OCHRANNÉ VRSTVY HDPE KOMPOZITŮ.....	26
4.2 NANOMORFOLOGIE A REAKCE NA OHEŇ TPU A PA NANOKOMPOZITŮ OBSAHUJÍCÍCH RETARDÉRY HOŘENÍ.....	28
4.3 SYNERGICKÉ ÚČINKY A MECHANISMUS VÍCEVRSTVÝCH UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIČEK S HYDROXIDEM HOŘEČNATÝM V NANOKOMPOZITU.....	29
4.4 SYNERGICKÉ PŮSOBENÍM BOROXY SILOXANU S HYDROXIDEM HOŘEČNATÝM NA BEZHALOGENOVÝ ZPOMALOVAČ HOŘENÍ V KOPOLYMERU EVA/MH.....	31
4.5 EFEKT UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIČEK A MONTMORILLONITU NA HOŘLAVOST V EPOXIDOVÝCH KOMPOZITECH.....	32
4.6 NANOKOMPOZITY LDPE/MG-AL DVOJVRSTVÉ HYDROXIDY: TEPELNÉ VLASTNOSTI A HOŘLAVOST.....	33
4.7 SYNERGICKÝ EFEKT MEZI ČINIDLEM PRO ZUHELNATĚNÍ A POLYFOSFOREČNANEM AMONNÝM PROTI ODKAPÁVÁNÍ POLYLAKTIDU.....	35
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	37
6 PŘÍPRAVA KOMPOZITŮ	38
6.1 LDPE KOMPOZITY.....	38
6.1.1 Materiál.....	38

6.1.2	Příprava LDPE kompozitů	40
6.2	PLA KOMPOZITY	41
6.2.1	Použité materiály	41
7	ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI.....	44
7.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	44
7.2	PODMÍNKY MĚŘENÍ	44
7.3	VÝPOČET A KLASIFIKACE	45
7.4	NAMĚŘENÁ DATA A VYHODNOCENÍ	46
7.5	SHRnutí.....	63
8	MECHANICKÉ VLASTNOSTI – TAHOVÉ ZKOUŠKY	65
8.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	65
8.2	PODMÍNKY MĚŘENÍ	65
8.3	NAMĚŘENÁ DATA A VYHODNOCENÍ	65
8.4	SHRnutí.....	83
9	REOLOGICKÉ VLASTNOSTI	84
9.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	84
9.2	PODMÍNKY MĚŘENÍ	85
9.3	NAMĚŘENÁ DATA A VYHODNOCENÍ	86
9.3.1	Směsi LDPE	86
9.3.2	Směsi PLA	88
9.4	SHRnutí.....	92
10	RENTGENOGRAFIE: STANOVENÍ KRYSTALINITY.....	93
10.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	93
10.2	PODMÍNKY MĚŘENÍ	93
10.3	NAMĚŘENÁ DATA A VYHODNOCENÍ	93
10.4	SHRnutí.....	98
11	SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE.....	99
11.1	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK	99
11.2	PODMÍNKY MĚŘENÍ	99
11.3	NAMĚŘENÁ DATA A VYHODNOCENÍ	99
11.4	SHRnutí.....	105
	ZÁVĚR	106
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	108
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	110
	SEZNAM OBRÁZKŮ	114
	SEZNAM TABULEK.....	116
	SEZNAM GRAFŮ	118
	SEZNAM PŘÍLOH.....	120

ÚVOD

V současné době je stále intenzivně zkoumán vliv plniv, především nanoplňiv, na vlastnosti polymerů. Směsi polymerů s plnivem/nanoplňivou obecně nazýváme kompozity/nanokompozity. Dříve se plniva užívaly pouze pro zlevnění výrobků, dnes ale využíváme plniva i k vylepšení vlastností materiálů. Aplikace plniv jsou velmi různorodé od použití jako pigmenty a barviva (např. křída či saze), přes plniva zlepšující mechanické vlastnosti polymerních materiálů (např. skelná a uhlíková vlákna, saze), po retardéry hoření. V souvislosti s retardéry hoření se v posledních letech jeví jako zajímavé studium vlivu nanoplňiv např. uhlíkových trubiček (CNT) na hořlavost polymerní matrice. Stejně jako u CNT je zkoumán rovněž vliv nanoplňiv na bázi jílu na hořlavost. Odborné publikace prezentují slibné výsledky, kdy CNT i nanoplňiva na bázi jílu jsou schopny částečně zlepšit odolnost proti hoření. Studie zlepšování odolnosti proti hoření jsou důležité především z hlediska bezpečnosti.

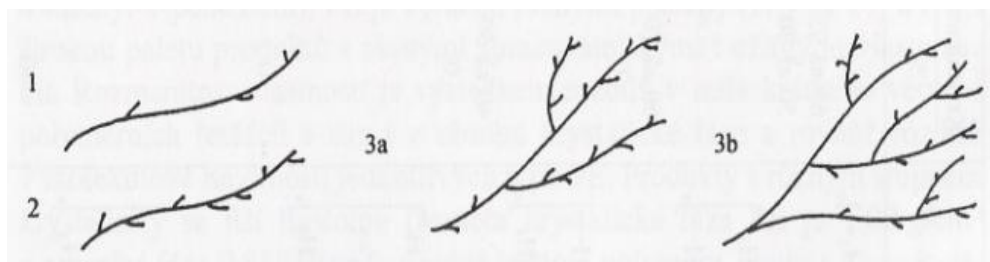
Cílem předložení diplomové práce bylo vytvořit nanokompozity s různými nanoplňivami a retardéry a zkoumat vliv nanoplňiv na hořlavost, rovněž byl zkoumán synergický účinek nanoplňiv a klasických retardérů hoření. Dále byly testovány mechanické a reologické vlastnosti, a morfologie připravených materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 POLYMERY

1.1 Polyethylen - PE

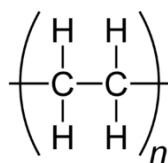
Patří do skupiny polymerů, která se nazývá polyolefiny. Současně se řadí do skupiny nepolárních polymerů. Základním monomerem pro PE jsou α -olefiny. Základní strukturu PE tvoří uhlíkový řetězec bez bočních substituentů. Dříve se vyráběly PE jako homopolymery, v současnosti se vyrábí většinou kopolymery ethenu s α -olefiny. PE je vyráběn různými způsoby, čímž tvoří širokou škálu materiálů s různými zpracovatelskými i užitnými vlastnostmi. Tyto rozdíly jsou dané mírou krátkého větvení řetězců, obsahem krystalické fáze a rozdíly v molekulové hmotnosti jednotlivých PE. Pro třídění PE je důležitá hustota, která závisí právě na míře krystalinity, a charakterizace tvaru řetězce. Základní typy PE jsou LDPE, HDPE a LLDPE. [1,2]



Obrázek 1.: Struktura makromolekul různých typů PE: 1 – HDPE, 2 – LLDPE (krátké větvení), 3 – LDPE (dlouhé a krátké větvení, a – trubkový reaktor, b - autokláv) [1]

1.1.1 Nízkohustotní polyethylen – LDPE

Patří do skupiny tří základních PE, jak je zmíněno výše. Může být však označován i jako vysokotlaký PE, podle polymerizačního tlaku.



Obrázek 2.: Chemická struktura polyethylenu [3]

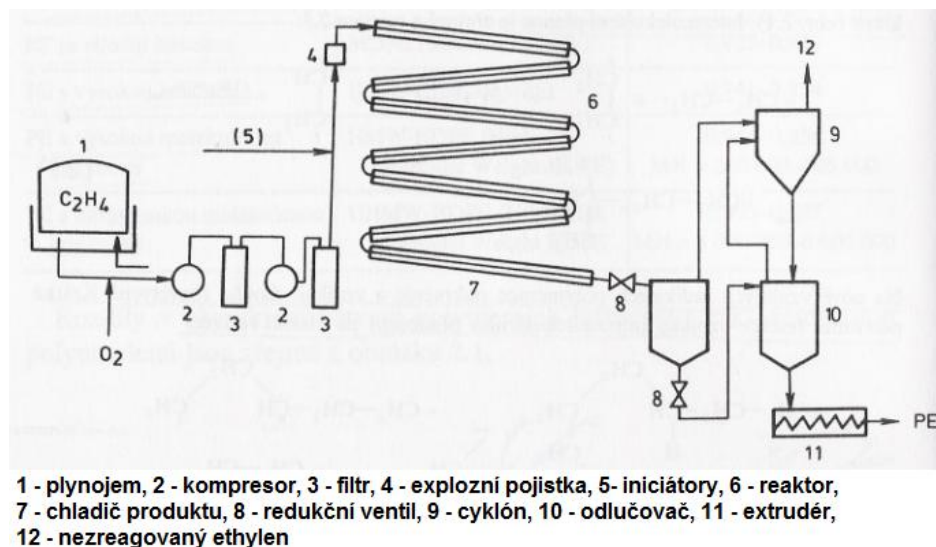
Vyrábí se radikálovou polymerací při vysokých teplotách a extrémně vysokých tlacích. V současné době se pro výrobu LDPE využívá dvou postupů. Jedná se o polymeraci v trubkovém reaktoru a v autoklávu.

Pro iniciaci polymerace se používají peroxidické iniciátory. Typickými peroxidickými iniciátory jsou např. terc.butylhydroperoxid, terc. butyperoxy-pivafát, terc. butyperneodekanoát, terc. butylperoxybenzoát nebo peroxydikarbonáty jako bis(isobutyl)peroxydikarbonát a bis(propyl)peroxydikarbonát. [1]

1.1.2 Výroba

1.1.2.1 LDPE v trubkovém reaktoru

Jedná se o vysokotlakou polymeraci ethenu. Trubkový reaktor je sestaven z 500 až 1 500 m dlouhé trubice, která je stočena do smyček, podobně jako had. Vnitřní průměr reaktorové trubky je 3 až 6 cm. [1]



Obrázek 3.: Schéma trubkového reaktoru pro výrobu LDPE [1]

Při polymerizaci vzniká značné množství tepla, které je nutno odvádět, a proto je reaktorová trubka opatřena teplosměnným médiem pro dobrý odvod tepla. Ethen s produktem proudí reaktorem rychlostí asi $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Polymerace probíhá v plynné fázi. Ethen je stlačován několika kompresory. Iniciátory a regulátory molekulové hmotnosti jsou do jednotlivých reakčních zón vstříkovány vysokotlakými injektory.

Reakční teplota se v různých částech reaktoru liší, po dosažení iniciační teploty kolem 140 °C asi v první třetině délky reaktoru prudce stoupá za rozkladu vysokoteplotních iniciátorů a maxima kolem 330 °C dosahuje ve druhé třetině délky reaktoru. Vlastnosti produktu mohou být ovlivňovány teplotním profilem v jednotlivých částech reaktoru, koncentracemi různých iniciátorů a regulátoru molekulové hmotnosti i rychlostí průchodu reakční směsi reaktorem.

Polymerační doba v reakčních zónách se pohybuje mezi 20 s až 2 minut, přičemž na konci reaktoru je dosahováno 30-35 % konverze ethenu. Voskovité podíly a nezreagovaný monomer jsou od taveniny polyethylenu oddělovány na několika separátorech a ethen je dále recyklován. Do taveniny vyrobeného polyethylenu jsou přidávány antioxidanty, pigmenty, barviva, plniva, UV-stabilizátory a další aditiva. Tavenina je následně vytlačována a peletizována. Na trubkových reaktorech se vyrobí přibližně asi 6 až 18 t LDPE/hod.

V současné době se LDPE prodává pod obchodními názvy Bralen (Slovnaft) či např. Lupolen (BASF). [1]



Obrázek 4.: Logo firmy Slovnaft [4]

1.1.2.2 Polymerace v autoklávu

Podobné uspořádání jako trubkový reaktor má i výrobní zařízení s autoklávem. Polymerace však probíhá při nižší teplotě a i při nižším tlaku. Teplota se pohybuje okolo 120 °C a tlak 125 MPa. Používají se míchané autoklávy jednostupňové se zpětným mísením (poměr výšky k šířce je asi 4) nebo vícestupňové (poměr výšky k šířce reaktoru je až 20), u nichž je zpětné mísení (back-mixing) mezi jednotlivými částmi reaktoru omezeno. Oproti předchozí metodě je konverze pouze 20 %. Zdržná doba směsi v autoklávu je jen 60 s. Autokláv je vyhříván pomocí reakčního tepla, ale současně je chlazen vstřikováním chladného monomeru. Polymerace probíhá v jednotlivých zónách a při různých teplotách.

[1]

1.1.3 Vlastnosti

LDPE je houževnatý polymer, relativně měkký, lze do něj udělat vryp nehtem. Mléčně zabarvený, ale průhledný. Hustotu má menší jak voda, na hladině plave. Jak jsem zmínila výše, je nepolární, tudíž je rozpustný pouze v nepolárních rozpouštědlech. Při zkoušce plamenem voní po parafinu, odkapává, roztavený je čirý a plamen je modrý se žlutou špičkou.

Na trhu se můžeme setkat s různými typy LDPE. Většinou se dělí podle ITT.

Základní vlastnosti LDPE:

- $T_m = 105 - 115 \text{ }^\circ\text{C}$
- Krystalinita: 50 – 70 %
- $\rho = 0,915 - 0,935 \text{ g/cm}^3$
- $E = 200 - 400 \text{ MPa}$

Zpracovatelské teploty doporučuje výrobce, konkrétně Slovnaft, 150 – 165 °C. [5]

1.1.4 Zpracování a použití

Využívá se běžných způsobů zpracování jako je vstřikování, vytlačování nebo vyfukování. Polyethylen se řadí mezi termoplasty, proto se fixace tvaru provádí chlazením. Zpracovává se na fólie, desky, sáčky, trubky, lahve, tuby na kosmetiku apod. [2]

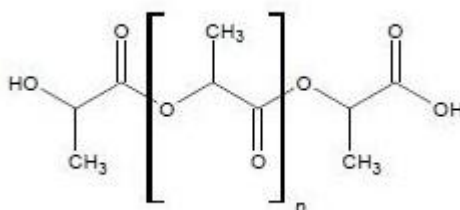


Obrázek 5.: Lahvičky vyrobené z LDPE [6]

1.2 Polylaktid – PLA

Jedná se o polymer kyseliny mléčné. Ze zpracovatelského hlediska jej lze zařadit do skupiny termoplastů, stejně jako LDPE. Z chemického hlediska se jedná o alifatický polyester. Vstupní surovinou pro výrobu PLA jsou rostliny produkující škrob, nejčastěji je to kukuřice. Jedná se tedy o polymer vyrobený z obnovitelných zdrojů. K výrobě mohou sloužit i jiné obnovitelné zdroje sacharidů ve formě škrobu nebo cukrů jako jsou ječmen, cukrová řepa nebo zemědělské odpady s fermentovatelnými rostlinnými cukry. Škrob se z rostlin vyextrahuje a štěpí se na základní stavební jednotky – glukózu, která je bakteriemi mléčného kvašení - pomocí fermentace, převedena na kyselinu mléčnou (2 – hydroxypropionovou kyselinu). Následnou chemickou polymerací kyseliny mléčné vzniká požadovaný polymer. [7,8] Samotná výroba pomocí rafinace je velmi efektivní. Pro zajímavost, z cca 1 km² kukuřice lze získat 200 – 400 tun PLA. [9]

PLA se řadí mezi biologicky rozložitelné polymery. Právě polyestery, mezi ně patří i PLA, se ukázali jako biokompatibilní a jsou vhodné pro použití v lékařství. Pro medicínské aplikace lze uvést např. vstřebatelný šicí materiál. Degradace probíhá hydrolýzou esterové vazby a degradační produkty jsou poté vyloučeny metabolickými cestami. [8]



Obrázek 6.: Chemický vzorec polylactidu (PLA) [10]

1.2.1 Výroba

Polylaktid se může připravovat buď přímo a to polykondenzací, nebo metodou polymerace otevřením kruhu, tzv. ring opening polymerization (ROP). Při výrobě polykondenzací vzniká nízkomolekulární produkt - voda, kterou je nutné v průběhu reakce odstraňovat, čímž se komplikuje výroba. Výsledný polymer má také nízkou molekulární hmotnost a proto se této metody spíše nevyužívá. Pro výrobu PLA se používá přednostně polymerace otevřením kruhu, při které polymer dosahuje vysokých hodnot molekulární hmotnosti. [7]

1.2.1.1 Polykondenzace

Jde o polykondenzaci pomocí funkčních skupin. Kyselina mléčná obsahuje karboxylovou a hydroxylovou skupinu, které následně vytváří při reakci esterové vazby. Přímou polykondenzací ale vzniká produkt s nízkou molekulovou hmotností, kterou zapříčiňuje právě nutnost odstranit, vydestilovat, vedlejší nízkomolekulární produkt jako je voda. V Japonsku využívají polykondenzační reakce v organickém rozpouštědle, kde rozpouštědlo slouží jako absorbent a odvádí vodu v průběhu polykondenzace. Lze tak získat relativně vysokomolekulární produkt. Při polykondenzaci bez rozpouštědel jsou ale reakční časy příliš dlouhé a výsledný produkt má naopak nízkou molekulovou hmotnost, jak je zmíněno výše, je křehký, sklovitý a také proto se využívá pro výrobu PLA spíše ROP. [7,9]

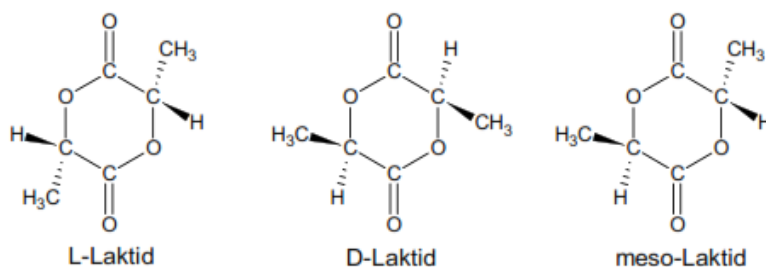
1.2.1.2 ROP – polymerace otevřením kruhu

Metoda spočívá v dimeraci monomeru kyseliny mléčné a vzniklý produkt je následně katalyticky za zvýšené teploty převeden na polymer o vysoké molekulární hmotnosti. Metoda je popsána ve dvou krocích.

V prvním kroku je připravena polykondenzací kyselina mléčná. Polykondenzací vzniká prepolymer kyseliny mléčné s nízkou molekulární hmotností, který se depolymeruje pomocí např. cínatých katalyzátorů na laktid.

Protože kyselina mléčná obsahuje asymetrický uhlíkový atom, vykazuje optickou aktivitu. Podle toho poté můžeme získat i výsledný laktid:

- PLLA – získáme ho z isomeru kyseliny L – mléčné, od toho odvozený L - laktid
- PDLA – získáme ho z isomeru kyseliny D – mléčné, od toho odvozený D - laktid
- PDLA – z kyseliny LD – mléčné, jedná se o směs isomerů L a D, tzv. meso laktid [7,11]



Obrázek 7.: Stereometrie laktidu [11]

Ve druhém kroku poté probíhá samotná polymerace. Většinou probíhá v tavenině, je ale možná i suspenzní, emulzní a roztoková polymerace. Vlastní polymerace probíhá při různých teplotách, v závislosti na tom, jaký laktid polymerujeme. Nejvíce se používá L – laktid, který se polymeruje při teplotách 105 – 180 °C. [7,11]

1.2.2 Vlastnosti PLA

PLA je relativně křehký, ale tvrdý polymer. Destička o tloušťce 2 mm po ohnutí praská, vzniká lom s ostrými hranami. Čisté PLA je téměř čiré. Hustotu má vyšší jak voda ($\sim 1,25 \text{ g/cm}^3$). [11]

Nevýhodou je nasákavost, proto je důležité materiál před zpracováním vysušit. Teplota zpracování je udávána okolo 200 °C pro tváření. Při tvarování, např. desek, postačí teplota v rozmezí 80 – 110 °C. [11]

Další zajímavou vlastností polylaktidu je jeho biologická rozložitelnost. Obecně probíhá biologická rozložitelnost v přítomnosti mikroorganismů. U polylaktidu probíhá pomocí hydrolýzy a rozkladu esterových vazeb, při působení vyšší teploty a vlhkosti. Vzniklé oligomery jsou následně rozkládány mikroorganismy na vodu, oxid uhličitý a biomasu. Proto je polylaktid vhodný pro kompostování, které probíhá za vyšší teploty a vlhkosti. [7]

1.2.3 Zpracování a použití

PLA se zpracovává jako běžný termoplast. Vhodné je vstřikování, lisování, vytlačování s vyfukováním a v poslední řadě vytlačování fólií a desek pro další zpracování, např. tvarováním. Lze použít i na výrobu vláken. Fixace tvaru se provádí chlazením, jako u běžných termoplastů. [11]

2 PLNIVA

Dříve byly plniva používány především pro snížení ceny, případně hmotnosti výrobku. To je hlavní funkce plniva. S rostoucím pokrokem a vyššími nároky na výrobky bylo zjištěno, že plniva mohou mít vliv i na jiné vlastnosti polymerů. Příkladem mohou být saze: dříve používané jako barvivo, dnes ale hojně využívané plnivo pro zlepšení mechanických vlastností pryží, či jako elektricky vodivá složka pro výrobu antistatických podlah z PVC.

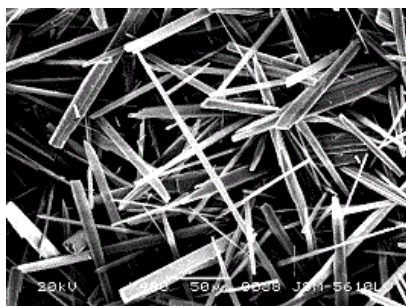
Díky těmto objevům se začala plniva využívat hojně pro výrobu kompozitů. V předmětu Kompozitní materiály přírodní a syntetické jsme měli možnost do této problematiky nahlédnout. V programu CES Edu Pack jsme v rámci cvičení simulovali kompozity různých matic a plniv.

V současné době se výzkum zaměřuje na synergické účinky určitých dvojic přísad, např. retardéry hoření s plnivem, pigmenty pro zlepšení UV stability apod. [12,13]

Charakter plniva je dán:

- Chemickou strukturou
- Tvarem částice
- Velikostí částice
- Hmotností [13]

Dle chemické struktury je možné plniva rozdělit na organická a anorganická. Případně lze plniva rozdělit podle způsobu získání, a poté mluvíme o plnivech přírodního či chemického původu. [14]



Obrázek 8.: SEM fotografie Wollastonitu s jehlicovitým tvarem částic [15]

Tvar částice může ovlivnit výsledné vlastnosti kompozitů. Rozlišujeme několik základních tvarů plniv:

- Kulové (skleněné kuličky)
- Krychlové (uhličitan vápenatý)
- Jehlicovité (Wolastonite)
- Destičkovité, příp. vločkovité (jíly, mastek, slída)
- Fibrilární – jedná se o vlákna (skelná, uhlíková)
- Směsi různých tvarů [13,14]

Tvar plniva může ovlivnit mechanické vlastnosti kompozitu. Vlákna zvyšují ohybový modul. Uhličitan vápenatý se strukturou krychliček zlepšuje modul, ale i rázovou houževnatost. Mnohostranné užití může mít mastek – lze jej různě modifikovat. [12]

Velikost částic se pohybuje v rozmezí od několika nanometrů až do řádů milimetrů. Potom rozlišujeme nanoplniva, která mají alespoň jeden rozměr v řádech od 1 do 100 nm, a mikroplniva, které mají rozměry v mikrometrech.

3 HOŘLAVOST POLYMERŮ

Hoření představuje termooxidační reakci. Hořlavost je definována řadou podmínek, např. odolností vůči vznícení. Jedná se o nežádoucí reakci a hořet můžou za určitých podmínek téměř všechny organické polymery.

Hoření, respektive spalování, je komplexní proces. Prvotně dochází k dodání tepla, jež následkem dochází k tepelné degradaci, rozkladu, pyrolýze. Rozkladnými procesy vznikají nízkomolekulární produkty (plynného charakteru), které se ohřívají nad teplotu vznícení a po jejím překročení dochází tedy k jejich vznícení. Hořením těch produktů vzniká další teplo dodávané polymeru, který dále tepelně degraduje, vznikají tak další plynné produkty a hoření polymeru pokračuje. [1,13,16]

Dá se říci, že hoří všechny organické materiály (mezi ně patří polymery), naopak materiály anorganické, např. sklo či kovy, jsou nehořlavé. [1,16]



Obrázek 9.: Ohořené plastové kontejnery na třídění odpad [17]

Některé polymery mají lepší odolnost proti hoření, jiné horší. Některé typy polymerů se při zkouškách hořlavosti po prvním zapálení samy zhasí. Hořlavost je tedy různá pro různé polymery v závislosti na stavební jednotce tvořící daný polymer. Bylo zjištěno, že polymery s aromatickými řetězci jsou odolnější proti hoření než polymery s alifatickými řetězci. Hořlavost ovlivňují i prvky obsažené v polymeru působící jako inhibitory hoření, obsažené v polymeru. Jedná se především o halogeny a fosfor. Vliv na hoření má i síťování a větvení, typ vazebných skupin či např. sklon k dehydrataci. Hořlavost, respektive odolnost proti hoření, neznamená, že polymer nehoří vůbec, ale že je těžké jej zapálit a spálit.

K úpravě hořlavosti polymerů se používají speciální aditiva, která se nazývají retardéry hoření. [1,16]

3.1 Retardéry hoření

Tímto pojmem se označují všechny materiály, které zpomalují hoření polymeru.

Jak je zmíněno výše, hořlavost ovlivňují i prvky obsažené v polymeru, např. halogeny a fosfor. Proto se tyto prvky se využívají pro výrobu retardérů hoření. [1, 13]

Pro snížení hořlavosti se užívají 2 mechanismy retardace hoření a to buď chemický nebo fyzikální.

1. *Fyzikální způsob:*

- Endotermní reakce, kdy dochází ke spotřebě tepla a k chlazení materiálu;
- vytvoření ochranné vrstvy, která brání přístupu tepla a kyslíku k polymeru;
- uvolnění vodní páry a oxidu uhličitého, což může zředit radikály v plameni.

2. *Chemický způsob:*

- Reakce v plynné fázi:
 - Radikální reakce v plameni mohou být přerušeny retardérem hoření tak, že koncentrace radikálů poklesne pod kritickou hodnotu a plamen zhasne. Procesy, které uvolňují teplo, jsou tedy zastaveny a systém se ochladí. Nicméně, zasahování do reakcí, které probíhají v plameni, vede často k vysoce toxickým, dráždivým a částečně spáleným produktům, včetně oxidu uhelnatého (CO), které obecně zvyšují toxicitu plynů za současného redukování růstu ohně.
- Reakce v pevné fázi:
 - Retardéry hoření rozkládají polymer, takže taje jako kapalina a odtéká od plamene. Ačkoliv tato modifikace dovolí materiálu projít některými testy hořlavosti (např. ČSN EN 60695-11-10), tak je požární bezpečnost ohrožena vznikajícími hořlavými kapkami.
 - Tvorba zuhelnatělé vrstvy na povrchu. Lepší retardéry hoření jsou ty, které formují zuhelnatělou vrstvu spalin na povrchu polymeru. Tato situace může například nastat, když retardér hoření odstraní postranní řetězce polymeru a tím vytvoří v polymeru dvojné vazby. Nakonec, tyto uhlíkové vrstvy vytvoří aro-

matické kruhy. Formace zuhelnatělé vrstvy obvykle snižuje tvorbu kouře a dalších produktů nedokonalého spalování.

- Intumescence, pěnotvorné systémy. Začlenění nadouvadla způsobuje bobtnání povrchové vrstvy a poskytuje mnohem lepší izolaci pod ochrannou bariérou. Stejná technologie se používá pro nátěry na ochranu dřevěných budov a ocelových konstrukcí. [18]

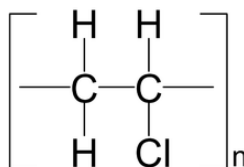
Obecně lze retardéry hoření rozdělit podle chemického složení na 4 typy. A to jsou:

- Halogenové retardéry
- Retardéry obsahující fosfor
- Anorganické oxidy a hydroxidy
- Retardéry obsahující křemík [13]

3.1.1 Halogenové retardéry

Jedná se především o chlorované či bromované sloučeniny. V současnosti je trend používat více retardéry bezhalogenové, protože retardéry s halogeny mohou škodit životnímu prostředí.

Již některé běžné polymery obsahují prvky, které mohou působit jako retardéry. Příkladem může být PVC, které obsahuje v základní meru atom chlóru. Problémem hořlavost ale zůstává nadále, jelikož se do PVC přidávají jiná aditiva, která hořlavost mohou naopak snižovat. Proto je pro určité aplikace nutnost přídavku retardérů hoření. [16]



Obrázek 10.: Chemický vzorec PVC [19]

Obecně lze říci, že u halogenových retardérů je retardace dána účinkem rozštěpení vazby vodík – halogen. Stabilita vazeb klesá následně: $F > Cl > Br > I$, tzn. že sloučeniny jódu mají nejnižší stabilitu, které je již pro použití nevhodná. Naopak fluor má vysokou

stabilitu, která je také nevhodná. Proto se halogenové retardéry připravují na bázi chlóru a brómu. [16]

3.1.2 Retardéry obsahující fosfor

Elementární fosfor a jeho sloučeniny jsou používány v široké škále materiálů pro retardaci hoření. Do této škály lze zahrnout červený fosfor, anorganické fosfáty a organické sloučeniny fosforu. Spolu s tlakem na používání bezhalogenových retardérů se otevřela cesta pro používání retardérů na bázi fosforu. Nový výzkum probíhá i v testování synergických vlastností retardérů na bázi fosforu spolu s organickými ohnivzdornými prvky (halogeny a dusík) či s některými anorganickými nanoplňivy, jako např. uhlíkové nanotrubičky. Zdokumentovány a hojně využívány jsou synergické účinky fosforu a dusíku, případně fosforu a halogenů.

Přestože retardéry na bázi fosforu mají široké použití, nejsou vhodné pro styrenové pryskyřice a polyolefiny. Retardéry z červeného fosforu jsou použitelné pro všechny teplem tvrditelné pryskyřice a elastomery. Při použití těchto retardérů ale dochází k většímu vývinu sazí a kouře a také je zde poměrně vyšší hodnota poměru CO/CO₂, což lze označit jako negativní vlastnost. Výrazný problém tak může nastat při hoření např. v budovách, respektive v uzavřených prostorech.

Sledována byla i toxicita retardérů. Obecně platí, že fosfor obsahující látky zpomalující hoření vykazují nízkou až střední toxicitu. Měřeny byly hodnoty akutní toxicity LD. Přesto existují výjimky! Tricresylfosfát působí neurotoxicky a tri(2,3-dibrompropyl) fosfát má mutagenní/karcinogenní účinky.[16]

3.2 Testování hořlavosti

Na hodnocení hořlavosti existuje mnoho zkoušek. Jedna z nejznámějších je limitní kyslíkové číslo (limiting oxygen index – LOI). [1,20] Princip metody spočívá ve stanovení minimálního procentuálního zastoupení kyslíku ve směsi s dusíkem, které je ještě schopné udržet hoření malých zkušebních těles ve vertikální poloze za předepsaných podmínek zkoušky. Čím vyšší procento kyslíku je potřeba, tím je materiál odolnější. Zkušební tělíska jsou tyčinky nebo tenké desky o tloušťce do 10,5 mm. Metoda je vhodná pro tuhé, lamino-

vané nebo lehčené materiály s hustotou nad 100 kg/m³. U lehčených materiálů s hustotou do 100 kg/m³ se používá metoda podle ISO 3582:1978 Lehčené plasty a lehčené kaučukové materiály – Laboratorní hodnocení hořlavosti malých těles v horizontální poloze vystavených působení malého plamene. Metodu nelze použít pro materiály, které vykazují při zahřívání velké smrštění, např. vysoce orientované tenké folie. [21].

Další zkouškou, která se hojně užívá, je zkouška v plameni. Může se provádět ve vertikální i horizontální poloze. Více se používá vertikální testování. Zde se testuje hoření, či samozhášení tělíska o stanovených rozměrech dle normy, při zkoušce se bere ohled i na to, zda materiál odkapává a jestli odkapávající materiál zapálí buničinu položenou pod testovaným vzorkem. [22]

Další možností je testování teplotní stability polymerů. K tomu se používá termogravimetrická analýza (TGA). Princip metody spočívá na měření změny hmotnosti vzorku v závislosti na teplotě. Zařízení pro TGA obsahuje píčku, ve které je kelímek na vzorek napojený na velmi přesné váhy. Při měření je okolo vzorku inertní atmosféra. [23]

Hořlavost je možné zkoumat i pomocí kalorimetrů. Nejčastěji používaným typem je kuželový kalorimetr. [24,25] Princip spočívá v měření úbytku hmotnosti v závislosti na čase. Je možné získat více dat při měření na kalorimetru, např. rychlost uvolňování tepla (HRR) v závislosti na čase. [24]

4 SOUČASNÝ VÝZKUM A VÝVOJ

V současné době stále probíhá vývoj v oblasti nanokompozitů. Jednou z intenzivně studovaných oblastí je retardace hoření polymerů. Tímto tématem se zabývá i tato kapitola.

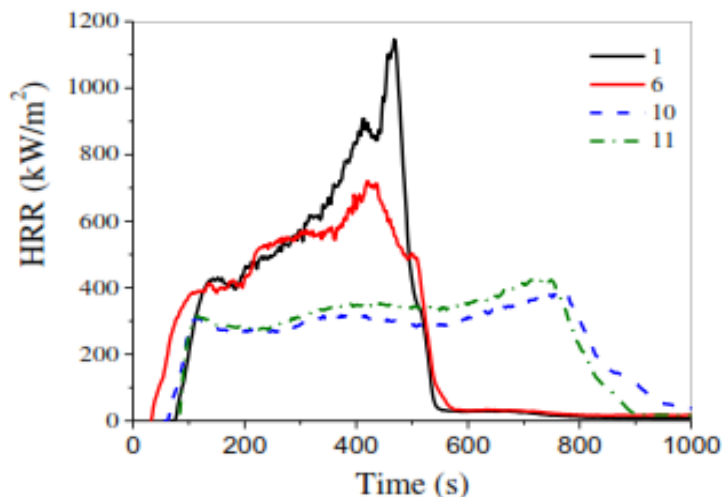
4.1 Srovnání efektu montmorillonitu, hydroxidu hořečnatého a jejich směsi na hořlavost a mechanismus tvorby ochranné vrstvy HDPE kompozitů

Pod vedením Joanny Lenzy [25] tým vědců zkoumal vliv nanoplňiv na hořlavost u vysokohustotního polyethylenu (HDPE) – Hostalen CRP Balck, Basell Olefins. Z nanoplňiv použili jílní montmorillonit Bentonite (MMT), ZGM “Ze₂ bic” SA, dále modifikovaný montmorillonit (OMMT) - Nanofil 5, Süd Chemie. Jako retardér hoření byl použit hydroxid hořečnatý (MDH) – Vertex™ 60 HST, J. M. Huber. Jako kompatibilizátor byl použit etylenvinyl acetát (EVA) – Icorene, ICO polymers. [25]

Tabulka 1.: Složení kompozitů LDPE [25]

Sample number	Sample code	HDPE	MMT	OMMT	MDH	EVA
1	HDPE	100	–	–	–	–
2	HDPE/MMT1	99	1	–	–	–
3	HDPE/MMT2	98	2	–	–	–
4	HDPE/MMT3	97	3	–	–	–
5	HDPE/MMT4	96	4	–	–	–
6	HDPE/MMT5	95	5	–	–	–
7	HDPE/OMMT1	99	–	1	–	–
8	HDPE/OMMT2	98	–	2	–	–
9	HDPE/OMMT3	97	–	3	–	–
10	HDPE/OMMT5	95	–	5	–	–
11	HDPE/EVA5/OMMT5	90	–	–	–	5
12	HDPE/MDH10	90	–	–	10	–
13	HDPE/MDH20	80	–	–	20	–
14	HDPE/MDH30	70	–	–	30	–
15	HDPE/MDH35	65	–	–	35	–
16	HDPE/MDH40	60	–	–	40	–
17	HDPE/MDH45	55	–	–	45	–
18	HDPE/MDH50	50	–	–	50	–
19	HDPE/MDH55	45	–	–	55	–
20	HDPE/MDH45/ EVA5/MMT5	45	5	–	45	5
21	HDPE/MDH45/ EVA5/OMMT5	45	–	5	45	5

Z měření vyplynulo, že u kompozitů HDPE/OMMT došlo k výraznému snížení uvolňování tepla (HRR), jak je vidět na obrázku 11.



Obrázek 11.: Závislost HRR na čase: (1) HDPE, (6) HDPE/MMT5, (10) HDPE/OMMT5, (11) HDPE/EVA5/OMMT5 [25]

Z měření hořlavosti také vyplynulo, že přidáváním MMT klesá hodnota LOI. Naopak přidáním MDH do polymeru LOI roste. Od koncentrace MDH 50 hm. % se nanokompozity staly samozhášecí a dosáhli klasifikace V-0 při testování UL 94 (tabulka 2.). [25]

Tabulka 2.: Hodnocení hořlavosti pro nanokompozity HDPE [25]

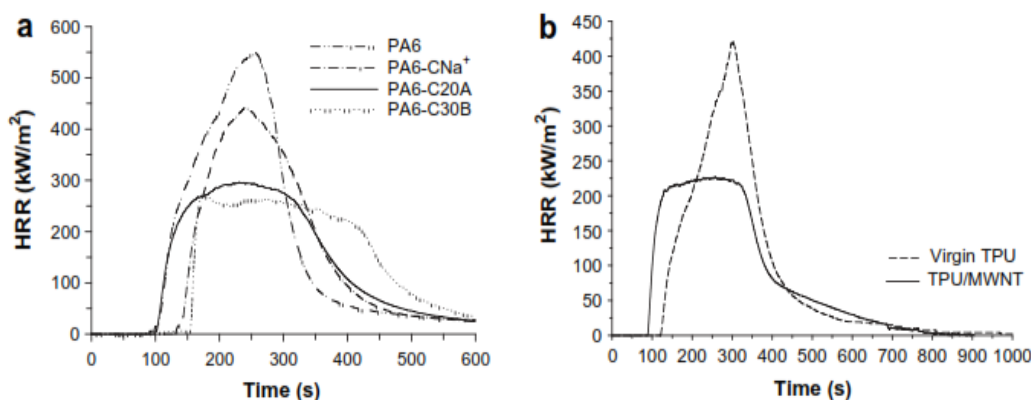
Sample number	Sample code	LOI (%)	UL-94 ranking	Dripping
1	HDPE	19.9 ± 0.11	Failed	Yes
2	HDPE/MMT1	19.7 ± 0.11	Failed	Yes
3	HDPE/MMT2	19.6 ± 0.16	Failed	Yes
4	HDPE/MMT3	19.4 ± 0.15	Failed	Yes
5	HDPE/MMT4	19.2 ± 0.15	Failed	Yes
6	HDPE/MMT5	19.1 ± 0.11	Failed	Yes
7	HDPE/OMMT1	20.0 ± 0.15	Failed	No
8	HDPE/OMMT2	20.1 ± 0.15	Failed	No
9	HDPE/OMMT3	20.4 ± 0.15	Failed	No
10	HDPE/OMMT5	20.6 ± 0.15	Failed	No
11	HDPE/EVA5/OMMT5	20.7 ± 0.11	Failed	No
12	HDPE/MDH10	20.1 ± 0.11	Failed	Yes
13	HDPE/MDH20	20.6 ± 0.16	Failed	Yes
14	HDPE/MDH30	22.7 ± 0.15	Failed	Yes
15	HDPE/MDH35	23.3 ± 0.11	Failed	Yes
16	HDPE/MDH40	24.3 ± 0.15	Failed	Yes
17	HDPE/MDH45	25.6 ± 0.11	Failed	Yes
18	HDPE/MDH50	28.4 ± 0.15	V-0	No
19	HDPE/MDH55	29.2 ± 0.15	V-0	No
20	HDPE/MDH45/ EVA5/MMT5	28.3 ± 0.11	V-0	No
21	HDPE/MDH45/ EVA5/OMMT5	29.6 ± 0.15	V-0	No

V závěru lze shrnout, že přidávkem OMMT dochází ke změně tepelné degradace a to zpomaluje rozklad HDPE. Současně tým zjistil pomocí FTIR rozboru, že vzniklá ochranná vrstva potvrzuje synergické efekty mezi OMMT, MDH a EVA [25]

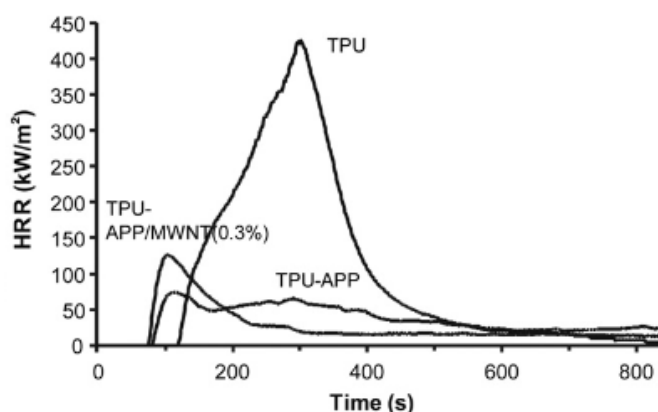
4.2 Nanomorfologie a reakce na oheň TPU a PA nanokompozitů obsahujících retardéry hoření

Tým vědců vedený Serge Bourbigotem [26] zkoumal vliv nanoplňiv na hoření v přítomnosti klasických retardérů hoření. Testovali dvě matrice termoplastů a to termoplastický polyuretan (TPU) – Elastollan C85A, BASF, a polyamid 6 (PA 6) - Technyl S27, RHODIA. Jako nanoplňiva použili jííl montmorillonit (MMT) - Cloisite Na⁺ (CNa⁺) a komerčně modifikovaný Cloisite 30A (C30B) a Cloisite 20A (C20A), Southern Clay Products, a vícevrstvé uhlíkové nanotrubičky (MWNT) - Nanocyl 7000, CLARIANT. Přičemž v TPU bylo plnění nanoplňiva na úrovni 2 % a v PA 5 %. Nanoplňiva byla kombinována s komerčními retardéry hoření na bázi fosforu Exolite AP 722, Exolite OP1311 a Exolite OP1230, CLARIANT. Nanokompozity byly připraveny přidávkem plňiva do taveniny polymeru, když celkový obsah retardéru byl pro TPU 30 % a pro PA 23 %.

Tým vědců Serge Bourbigota [26] dospěl k závěru, že nanostruktura proti mikrostruktuře plňiv výrazněji ovlivní rychlost uvolňování tepla – tepelný výkon (HRR). Např. u nanokompozitu PA 6/C30B došlo ke snížení HRR o 50 %. Výsledky HRR jsou vidět na obrázku 11 a 12. Dále bylo zjištěno, že začlenění 30 hm. % retardéru APP způsobilo snížení HRR až o 75 %. Při testování zkouškou UL 94 kompozit TPU/APP dosahuje kategorie V-2. Přidáním 0,3 hm. % MWNT se dosáhlo účinkem synergismu zlepšení na kategorii V-0. Stejný efekt byl pozorován u kompozitů PA. Vědci dále zjistili, že nanomorfologie není klíčová pro retardaci hoření.



Obrázek 12.: Závislost HRR na čase pro dané kompozitní materiály: pro kompozit PA 6/jíl a čistý PA 6 (a), pro kompozit TPU/MWNT a čistý TPU (b) [26]



Obrázek 13.: Závislost HRR na čase pro TPU modifikovaný retardérem APP a plnivem MWNT [26]

4.3 Synergické účinky a mechanismus vícevrstevných uhlíkových nanotrubiček s hydroxidem hořečnatým v nanokompozitu

Také autoři v čele s Y. Lei [27], zkoumali vliv vícevrstevných uhlíkových nanotrubiček (MWNT) firmy Shenzhen Bill Technology Development na hořlavost a to u kopolymeru ethylen-vinyl acetátu (EVA) s 28 hm. % vinyl acetátu od firmy Sumitomo Chemical z Japonska. Jako bezhalogenový retardér byl použit hydroxid hořečnatý (MH) firmy Jingjiang Kexing Nanomaterials, Čína. Přesné složení směsí je zobrazeno v tabulce 3.

Tabulka 3.: Složení nanokompozitů a výsledky měření LOI [27]

Samples	EVA (wt%)	MH (wt%)	MWNTs (wt%)	LOI (%)
EM-0	50	50	0	34 ± 0.5
EM-1	50	49	1	37 ± 0.5
EM-2	50	48	2	39 ± 0.5
EM-3	50	47	3	38 ± 0.5
EM-4	50	46	4	37 ± 0.5

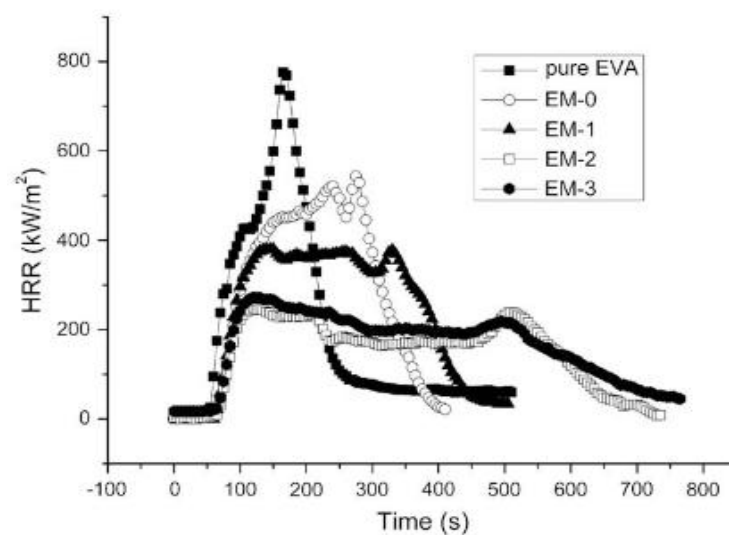
Z měření vyplynulo, že nejrychleji hořel čistý EVA. Po přidavku 50 hm. % MH došlo k dramatickému poklesu HRR (tabulka 4, obrázek 14). Nejnižší pokles HRR byl zaznamenán pro směs s obsahem 2 hm. % MWNT.

Poměr maxima křivky HRR (pk-HRR) k času potřebnému k zapálení (TTI) udává tzv. index požární odolnosti (FPI) a platí, že čím vyšší FPI je, tím lepší je požární odolnost.

V tabulce 4. jsou naměřená data hořlavosti. Z toho je patrné, že nejvyšší hodnotu FPI má nanokompozit EM-2 s obsahem 2 hm. % MWNT. [27]

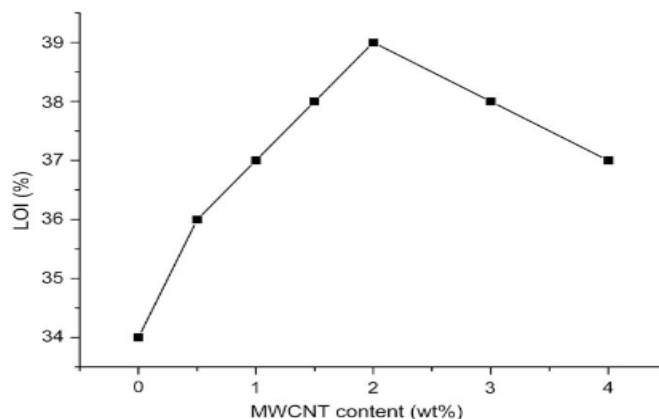
Tabulka 4.: Data hořlavosti pro čistý EVA a jeho nanokompozity [27]

Sample	TTI (s)	pk-HRR (kW/m ²)	FPI (m ² s/kW)	pk-MLR (gs ⁻¹ /m ²)	Combustion time (s)
Pure EVA	43	791.7 ± 35	0.054	0.197 ± 0.009	285
EM-0	55	548.2 ± 27	0.100	0.165 ± 0.008	407
EM-1	54	392.7 ± 19	0.138	0.127 ± 0.006	496
EM-2	53	252.6 ± 12	0.210	0.085 ± 0.004	735
EM-3	52	278.5 ± 14	0.190	0.094 ± 0.004	768



Obrázek 14.: Závislost HRR na čase pro čistý EVA a jeho nanokompozity [27]

Při vyhodnocování LOI nejlépe vyšel vzorek EM-2 se stanoveným LOI 39 % (obrázek 15). Odpovídá to výsledkům FPI uvedených výše. S vyšším plněním, 3 a 4 %, LOI klesá. [27]



Obrázek 15.: Závislost LOI na hm. % plnění MWCNT [27]

Ze studie týmu Y. Lei vyplývá, že přidávkem MWNT ke standardnímu retardéru hoření lze snížit hořlavost což naznačuje určité synergické účinky MWNT a MH. Autoři dále zjistili, že hořlavost je ovlivněna stupněm plnění MWNT, kdy např. LOI při plnění nad 2 hm. % MWNT vykazuje zhoršení. Také data z TGA potvrzují zvyšování odolnosti proti teplené degradaci. [27]

4.4 Synergické působením boroxo siloxanu s hydroxidem hořečnatým na bezhalogenový zpomalovač hoření v kopolymeru EVA/MH

V publikaci [28] autoři zkoumali synergické účinky hydroxidu hořečnatého (MH), boritanu zinečnatého (ZB) a boroxo silanu (BSil). V tabulce 5. je znázorněno složení jednotlivých nanokompozitů s vyhodnocením hořlavosti. [28]

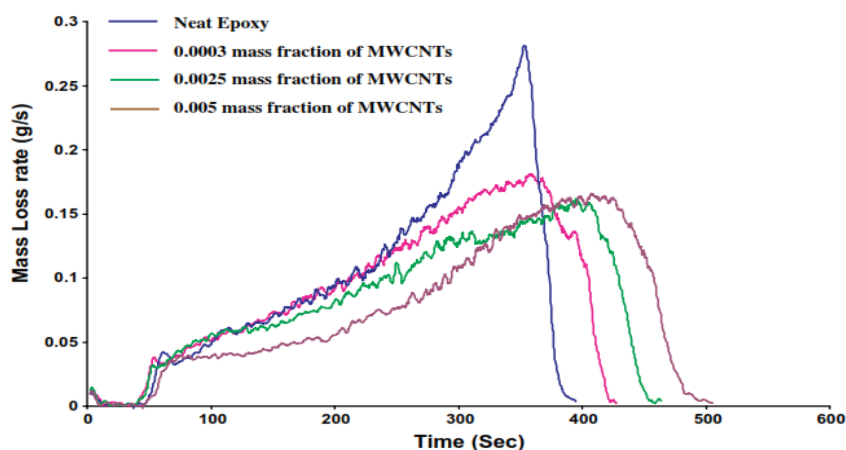
Tabulka 5.: Vyhodnocení hořlavosti LOI a UL 94 pro jednotlivé nanokompozity [28]

Sample	EVA (wt%)	MH (wt%)	BSil (wt%)	ZB (wt%)	Siloxane oligomers (wt%)	LOI (%)	UL-94
EM	40	60	/	/	/	39 ± 0.5	V0
EM-1BSil	40	59	1	/	/	46 ± 0.5	V0
EM-3BSil	40	57	3	/	/	47 ± 0.5	V0
EM-5BSil	40	55	5	/	/	46 ± 0.5	Fail
EM-3ZnB	40	57	/	3	/	41 ± 0.5	V0
EM-3Si-OH	40	57	/	/	3	45 ± 0.5	Fail

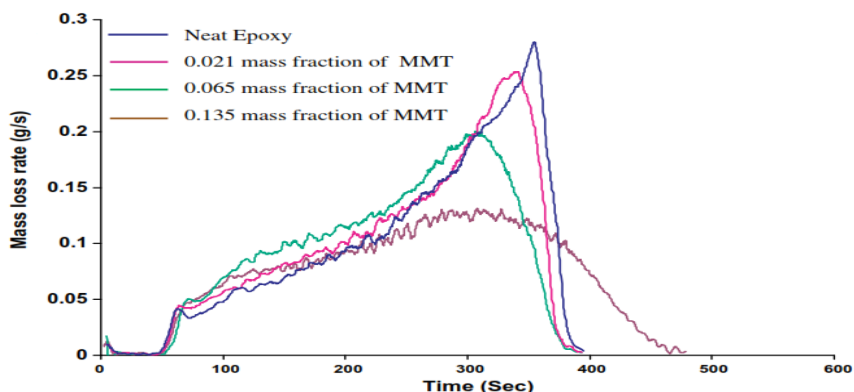
Stejně jako v předešlých studiích i zde nanokompozity vykazují synergismus, snižují HRR a prodlužují dobu spalování. Nahrazením HM 3 hm. % BSil získáme zvýšení hodnoty LOI o 8 % (tabulka 5). Rovněž TGA potvrzuje za přídavku BSil zvýšení odolnosti proti tepelné degradaci. [28]

4.5 Efekt uhlíkových nanotrubiček a montmorillonitu na hořlavost v epoxidových kompozitech

Autoři příspěvku [29] zaměřili svou pozornost na vliv uhlíkových trubiček a montmorillonitu v epoxidové matici na hořlavost. V experimentu byly použity vícevrstvé uhlíkové nanotrubičky (MWNT), které byly připraveny na univerzitě v Cambridge. Z jílu byl použit modifikovaný montmorillonit, Cloisite 30B, Southern Clay Products. Obě nanoplňiva byla míchána v Bisfenolu A. Následně bylo přidáno síťovací činidlo na bázi aminu, Jeffamine D-400, Huntsman Chemical Company. Nanokompozit epoxy/MWNT byl připraven s 0,0003, 0,0025 a 0,005 hm. % MWNT. Nanokompozit epoxy/MMT byl připraven s 0,021, 0,065 a 0,135 hm % jílu. Záznamy měření znázorňují obrázky 16 a 17. [29]



Obrázek 16.: Závislost MLR na čase pro nanokompozity epoxy/MWNT [29]



Obrázek 17.: Závislost MLR na čase pro nanokompozity epoxy/MMT [29]

I v tomto příspěvku autoři prokázali vliv použitých nanoplňiv na hořlavost. Lepší účinnost vykazaly uhlíkové nanotrubičky. S roustoucím stupněm plnění rostl vliv na sledované parametry směsí. Nutno však podotknout, že stupeň plnění byl v tomto případě velmi nízký, přesto bylo zaznamenáno významné zpomalení úbytku hmotnosti v čase (MLR – Mass Loss Rate), které u směsi s 0,005 hm. % MWNT bylo nižší o 50 %. U nanokompozitu s 0,0003 hm. % MWNT pak přibližně o 40 %. [29]

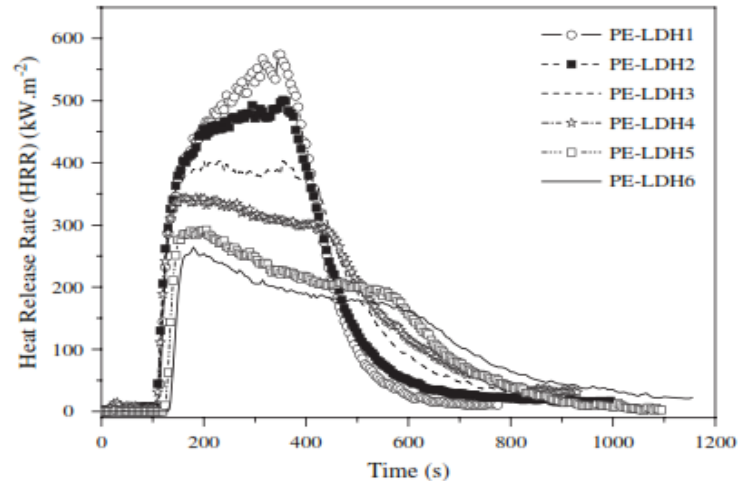
4.6 Nanokompozity LDPE/Mg-Al dvojrstvé hydroxidy: tepelné vlastnosti a hořlavost

Tým vědců pod vedením F. R. Costa [30] zkoumal vliv dvojrstvých hydroxidů (LDHs), konkrétně komerční Mg-Al dvojrstvého hydroxidu, Süd Chemie AG, v nízkohustotním polyethylenu (LDPE), Exxon Mobile. Specialitou LDH nanoplňiv je široký rozsah jejich chemického složení, možnost úpravy organickými aniontovými povrchově aktivními látkami a endotermický rozklad, při němž vzniká vodní pára a oxidy kovů. V tabulce 6. je složení nanokompozitů. [30]

Tabulka 6.: Složení nanokompozitů LDPE/LDH [30]

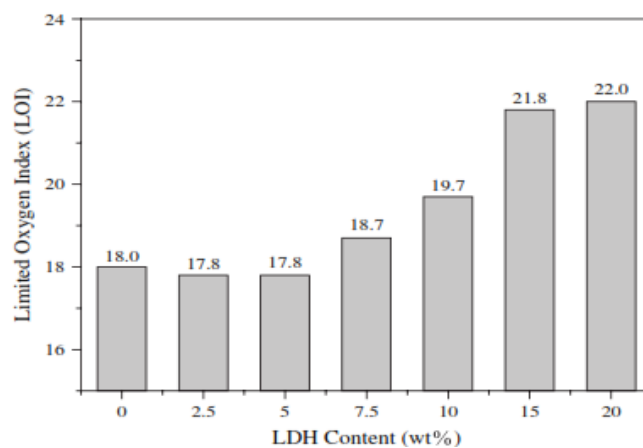
LDPE/LDH compositions	Metal hydroxide content, wt%
PE-LDH1	2.43
PE-LDH2	4.72
PE-LDH3	6.89
PE-LDH4	8.95
PE-LDH5	12.75
PE-LDH6	16.20

Testování hořlavosti bylo provedeno na kuželovém kalorimetru a bylo zjištěno, že zvyšováním koncentrace LDH dochází ke snižování HRR (obrázek 18.), což vede ke zpomalení hoření polymerů. Při měření čistého neplněného LDPE byly získány hodnoty HRR nad 800 kW/m^2 . [30]



Obrázek 18.: Závislost HRR na čase pro nanokompozity LDPE/LDH [30]

Pro neplněný LDPE byla naměřena hodnota LOI 18. Při následujícím plnění 2,5 hm. % a 5 hm. % hodnota LOI klesla. Při dalším plnění již hodnoty LOI rostly a při nejvyšším plnění 20 hm. % LDH dosáhla hodnota LOI 22 (obrázek 19.). [30]



Obrázek 19.: Závislost LOI na plnění pro nanokompozity LDPE/LDH [30]

Kromě hodnocení hořlavosti pomocí LOI byly vzorky hodnoceny i zkouškami UL 94 v horizontální (UL 94 HB) i vertikální (UL 94 V) poloze. Při měření UL 94 žádná

z koncentrací neprošla, protože vzorky po prvních 10 s v plameni spontánně hořely. Nicméně měření poskytlo užitečné informace o chování vzorků. Při vyšším plnění se čas, kdy materiál začal odkapávat, prodlužoval. Zpožděné odkapávání podle autorů může být způsobeno zvýšenou viskozitou.

Výsledky výzkumu ukázaly, že plněním nad 10 hm. % LDH lze zpomalit hoření a snížit odkapávání hořícího materiálu, přestože ve zkouškách hořlavosti LOI a UL 94 nedosáhly uspokojivých výsledků. [30]

4.7 Synergický efekt mezi činidlem pro zuhelnatění a polyfosforečnanem amonným proti odkapávání polylaktidu

Tým vědců Ch. H. Ke [31] zkoumal synergismus pro zuhelnatující aditivum (HPCA – hyperbranched polyamine charring agent) s polyfosforečnanem amonným (APP – ammonium polyphosphate) v matrici polylaktidu (PLA) a jejich vliv na zpomalení hoření a odolnost proti odkapávání materiálu. PLA 2002D dodala firma Natureworks Company. APP dodala firma Hangzhou Jieersi Chemical Company. HPCA byl připraven syntézou v rámci výzkumu.[31]

Tabulka 7.: Složení nanokompozitů a výsledky hořlavosti [31]

Sample	PLA	APP	HPCA	LOI	UL-94 rating
PLA-1	100			21	Fail
PLA-2	70	30		33	V-2
PLA-3	70	20	10	34	V-0
PLA-4	70	18	12	36.5	V-0
PLA-5	70	15	15	28	V-0
PLA-6	70	12	18	27.5	V-1
PLA-7	70	10	20	26.5	V-1
PLA-8	70		30	22	Fail
PLA-9	75	15	10	28.5	V-0
PLA-10	80	12	8	26.8	V-0
PLA-11	85	9	6	26.2	V-0
PLA-12	90	6	4	25.2	V-2

V tabulce 7. je složení jednotlivých nanokompozitů a jejich výsledky hodnocení hořlavosti metodou UL 94 a LOI. Nejlepšího výsledku se dosáhlo u vzorku PLA-4 s plněním 18 hm. % APP a 12 hm. % HPCA, kde byl předpokládán synergismus. Bylo zjištěno, že HPCA dobře tvoří ochrannou zuhelnatělou vrstvu a současně APP s HPCA vykazují dobrou účinnost proti odkapávání. [31]

PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

- 1) Vypracování literární rešerše na dané téma
- 2) Příprava polymerních směsí
- 3) Hodnocení vlastností:
 - Hořlavost
 - Mechanické vlastnosti
 - Reologické vlastnosti
 - Struktura a morfologie

Cílem teoretické části práce je seznámit s použitými matricemi a se základními pojmy týkající se hořlavosti, retardérů hoření a plniv.

Následující praktická část práce má seznámit s přípravou polymerních směsí, respektive kompozitů/nanokompozitů, a popisem jednotlivých použitých materiálů. Dále se zabývá hodnocením hořlavosti, mechanických a reologických vlastností, struktury a morfologie. Cílem praktické části je tedy prezentace získaných výsledků měřených vlastností a zjištěných synergických účinků mezi nanoplňivy a běžnými retardéry hoření.

6 PŘÍPRAVA KOMPOZITŮ

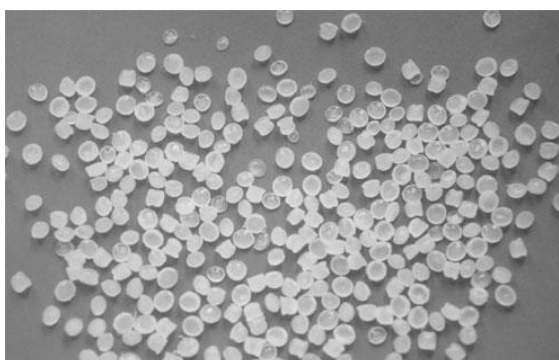
V souladu s cíli předložené diplomové práce byly připraveny kompozity o různých koncentracích složek. Polymerní matrice byla zastoupena nízkohustotním polyetylenem (LDPE) a kyselinu polymléčnou (PLA). Dále byly použity 2 typy standardních retardérů a 16 typů nanoplniv. Následující kapitoly popisují podrobně použité materiály a postupy přípravy směsí.

6.1 LDPE kompozity

6.1.1 Materiál

Polymerní matrice:

- Bralen RB 2-62: nízkohustotní polyetylen (LDPE), Slovnaft. Je to mléčně bílý granulát dodávaný v pytlích po 25kg, vhodný pro vstřikování a vytlačování.



Obrázek 20.: Granulát LDPE Bralen RB 2-62 [32]

Retardéry hoření:

- Exolite AP 766: je retardér na bázi fosforu – polyfosforečnan amonný, Clariant. Jedná se o bílý prášek bez zápachu určený pro polyolefiny. Retardér vykazuje výbornou UV stabilitu, dobré elektrické a mechanické vlastnosti, malý vývin kouře a jeho malou toxicitu, dobrá recyklovatelnost. [33]
- ADK STAB FP 2200: retardér na bázi fosforu a dusíku, Adeka Palmarole. Jedná se o bílý prášek bez zápachu určený pro polyolefiny. Retardér vykazuje výbornou ba-

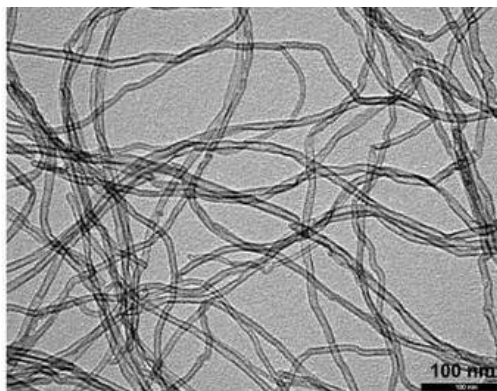
revnou stabilitu, odolnost vůči vodě, velmi nízké emise CO a CO₂, malý vývin kouře, kouř nezpůsobuje korozi, nízký stupeň plnění ve srovnání s hydroxidem horečnatým, má vyšší prašnost. [34]

Stabilizátor:

- Irganox B 225: tepelný stabilizátor o složení 50 % Irgafos 168 – na bázi fosfitu, a 50 % Irganox 1010 – na bázi fenolu, Basf. Jedná se o jemný bílý prášek s dlouhotrvajícím účinkem chránící polymer proti tepelné oxidaci.

Plniva:

- Nanocyl NC7000: vícevrstvé uhlíkové nanotrubičky, Nanocyl. Jedná se o černý prášek bez zápachu. MWCN mají průměr 9,5 nm a délku 1,5 μm s povrchovou plochou 250-300 m²/g. Tento typ nanotrubiček poskytuje nejvyšší elektrickou vodivost, která je v současnosti na trhu dostupná. Již při malém plnění jsou schopné zajistit vodivost polymerních materiálů.



Obrázek 21.: TEM snímek Nanocyl NC7000 [35]

- Grafmax HC 30: přírodní expandovaný grafit, National de Grafite. Jedná se o černý prášek bez zápachu.
- TriSilanolisobutyl POSS (POSS 1): Mnohostěnný oligomerní silsesquioxan, Hybrid Plastics. Jedná se o drobné bílé krystalky s průměrem do 0,5mm.

- OctaIsobutyl POSS (POSS 2): Mnohostěnný oligomerní silsesquioxan, Hybrid Plastics. Jedná se o drobné bílé krystalky s průměrem do 0,5mm.
- Pangel S-9: křemičitan hořečnatý (jíl), Tolsa. Jedná se o světle béžový prášek, na bázi sepiolitu. [36]
- Perkalite F100: synteticky připravený jíl na bázi vrstevnatých hlinito-hořečnatých hydroxidů, AkzoNobel. Jedná se o prášek. [37]
- Dragonite HP: aluminosilikátový jíl, který se řadí se mezi Halloysity, Applied Minerals. Jedná se o světle béžový prášek. Tento minerál vytváří duté trubičky, jde tedy i přírodní formu nanotrubiček. Průměr trubiček je menší než 100 nm a délka se pohybuje od 100 nm do cca 2 μm . [38]
- Dragonite koncentrát: směs Dragonite-XR 38 % a LDPE Bralen VA 20-60 61,75 hm. %, Irganox B 225 0,25 hm. % připravený v Polymer Institut Brno.

6.1.2 Příprava LDPE kompozitů

Kompozity s matricí tvořenou LDPE byly míchány v KO-hnětiči Brabender o objemu hnětací komory 45 cm³. Pro jednotlivé retardéry jsme zvolily 2 výchozí koncentrace. Pro retardér Exolite AP 766 (Exolite) jsme zvolily výchozí koncentraci 26 % a pro ADK STAB FP 2200 (ADK) pak 29 %. Pro nanoplňiva jsme měli 5 koncentrací, od kterých se potom odvíjela koncentrace retardérů. V následujících tabulkách jsou znázorněny použité koncentrace pro retardéry a plniva. Stabilizátor Irganox B 225 (Iganox) byl do všech směsí přidán v neměnné koncentraci 0,3 %.

Tabulka 8.: Složení LDPE kompozitů pro retardér Exolite AP 766

č. směsi	Matrice	FR	FR [%]	Nanoplňivo [%]
0	LDPE	Exolite	26	0
1	LDPE	Exolite	26	1
2	LDPE	Exolite	23	3
3	LDPE	Exolite	13	3
4	LDPE	Exolite	0	3

Tabulka 9.: Složení LDPE kompozitů pro retardér ADK STAB FP 2200

č. směsi	Matrice	FR	FR [%]	Nanoplňivo [%]
0	LDPE	ADK	29	0
1	LDPE	ADK	29	1
2	LDPE	ADK	26	3
3	LDPE	ADK	15	3
4	LDPE	ADK	0	3

Směsi byly míchány při nastavené $T = 130\text{ °C}$ a rychlosti 110 ot/min po dobu 20 min. Připravené směsi byly následně lisovány při $T = 150\text{ °C}$. Předehřev materiálu trval 5 min, vlastní lisování 4 min a chlazení 20 min při teplotě 35 °C . Vylisovaná destička měla rozměry $12,5 \times 12,5 \times 0,2\text{ cm}$.

6.2 PLA kompozity

6.2.1 Použité materiály

Polymerní matrice:

- PLA 2003D (PLA): polylaktid, NatureWorks. Jedná se o granulát určený pro výrobu extrudátů a tepelně tvarovaných výrobků. Biokompatibilní, lesklý, průhledný a biologicky rozložitelný materiál s hustotou $1,24\text{ g/cm}^3$.

Aditiva:

- BioAdimidTM100 (BIO 100): obsahuje min 10,5% aromatického karbodiimidu (skupina $N=C=N$), Rhein Chemie. Jedná se o bílý prášek o hustotě $0,97\text{ g/cm}^3$. Vylepšuje odolnost biopolyesterů proti hydrolýze a rozšiřují tak možnosti jejich použití.
- BioAdimidTM500 (BIO 500): obsahuje min 13 % aromatického karbodiimidu Rhein Chemie. Jedná se o bílý prášek o hustotě $1,05\text{ g/cm}^3$. Rovněž prodlužuje životnost biopolyesterů a stabilizuje taveninu při zpracování.

Plniva:

- Cloisite Na⁺, 10A, 20A,30B: vrstevnaté jíly na bázi montmorillonitu, Southern Clay Products. Jedná se o mírně nažloutlé prášky, které slouží jako zdroj nanočástic. Přírodní typ montmorillonitu je označen Cloisite Na⁺. Ostatní typy tj. 10A-30B představují organicky modifikovaný montmorillonit.

Tabulka 10.: Vlastnosti Cloisitů

	Cloisite Na ⁺	Cloisite 10A	Cloisite 20A	Cloisite 30B
Velikost částic [μm]	25	10	13	10
Hustota [g/cm ³]	2,86	1,9	1,77	1,98
d ₀₀₁ [nm]*	1,17	1,9	2,42	1,85

* - bazální mezivětrinná vzdálenost minerálu

- Nanofil SE 3010 (3010): organicky modifikovaný jílový minerál, Süd Chemie. Jedná se o prášek vhodný plnivo pro PA, PS, PET nebo ABS.
- Nanofil 116 (Nanofil): přírodní montmorillonit, Süd Chemie. Je to světle béžový prášek s hustotou 600 kg/m³, má tvar destiček o straně 20-200nm, které se mohou shlukovat do agregátů – tactoidů o tloušťce asi 1nm.
- Garamite1958 (Garamite): organicky modifikovaná směs minerálů, Southern Clay Products. Jedná se o matně bílý prášek. Obsah vlhkosti je menší než 6 % a hustota 1,5-1,7 g/cm³.

Nanokompozity PLA byly připraveny v rámci podpory programu AKTION projekt 63p24 (2012) a 66p21 (2013) na Montanuniversität Leoben v Rakousku.

Před smícháním složek v extrudéru byly jednotlivé složky sušeny při 60°C po dobu 24h. K míchání směsí byl použit dvojšnekový vytlačovací stroj ZSK-25 se šesti teplotními zónami, Coperion. Teploty jednotlivých zón byly následující: T₁ = 160 °C, T₂ = 170 °C, T₃ = 180 °C, T₄ = 190 °C, T_{5,6} = 200 °C. Rychlost posuvu materiálu při výrobě granulátu byla 6 kg/h a otáčky šneků 100 ot/min.

Z granulátů byly po jejich opětovném vysušení vylisovány destičky o rozměru 12,5 × 12,5 × 0,2 cm. Teplota lisování i přehřevu byla 200 °C. Přehřev trval 3 minut, vlastní lisování 2 minuty a chlazení trvalo 20 minut při cca 35 °C.

Přehled složení jednotlivých PLA směsí je zachycen v tabulce 11.

Tabulka 11.: Složení PLA nanokompozitů

Poř. č.	Matrice	Matrice [%]	Nano	Nano [%]	Aditivum	Aditivum [%]
1	PLA pure	100	-	-	-	-
2	PLA	99	Na+	1	-	-
3	PLA	97	Na+	3	-	-
4	PLA	95	Na+	5	-	-
5	PLA	98	-	-	BIO 100	2
6	PLA	93	Na+	5	BIO 100	2
7	PLA	93	10A	5	BIO 100	2
8	PLA	98	-	-	BIO 500	2
9	PLA	93	Na+	5	BIO 500	2
10	PLA	95	Nanofil	5	-	-
11	PLA	95	30B	5	-	-
12	PLA	95	20A	5	-	-
13	PLA	95	10A	5	-	-
14	PLA	95	3010	5	-	-
15	PLA	95	Garamite	5	-	-

7 ZKOUŠKA HOŘLAVOSTI

Testování hořlavosti probíhalo pomocí zkoušky plamenem podle normy ČSN EN 60695-11-10. Testování probíhalo ve vertikální poloze. Hořlavosti byly měřeny ve spolupráci s Polymerním Institutem Brno (PIB).

7.1 Příprava zkušebních tělísek

Vzorky byly připraveny nařezáním z předem nalisovaných destiček v PIB podle normy ČSN EN 60695-11-10. Pro každou směs jsme připravili 5 vzorků pro testování.

7.2 Podmínky měření

Zkoušku jsme prováděli podle postupu uvedeného v normě ČSN EN 60695-11-10.

1. Zkušební těleso se za horních 6 mm své délky upevní tak, aby jeho podélná osa byla svisle a jeho spodní konec byl 300 ± 10 mm nad vodorovně umístěnou bavlněnou vrstvou.
2. Kahan se nastaví a vyčká se nejméně 5 min, aby podmínky dosáhly rovnováhy.
3. Osa trubice kahanu se udržuje ve svislé poloze a plamen se přiloží tak, aby ve své ose působil na střed dolní hrany zkušebního tělesa a aby ústí trubice kahanu bylo 10 ± 1 mm pod tímto bodem. Kahan se v této vzdálenosti ponechá po dobu 10 ± 5 s, přičemž se v případě potřeby posunuje ve svislé rovině.
4. Jestliže ze zkušebního tělesa během působení plamene odkapávají kapky, sklopí se kahan pod úhlem nepřevyšujícím 45° a přitom se udržuje 10 ± 1 mm mezi středem ústí trubice kahanu a zbylou částí tělesa. Po uplynutí $10 \pm 0,5$ s se kahan odstaví a začne se měřit doba samovolného plamenného hoření t_1 .
5. Když samovolné plamenné hoření ustane, zkušební plamen se ihned znovu na dobu $10 \pm 0,5$ s přiloží ke zkušebnímu tělesu stejným způsobem jako při prvním zapalování. Po druhém přiložení se kahan po uplynutí $10 \pm 0,5$ s odstaví a začne se měřit doba samovolného plamenného hoření t_2 a doba samovolného žhnutí t_3 . Zjistí se a zaznamenává se i to, zda od zkušebního tělesa odpadly nějaké částičky a pokud ano, zda zapálily bavlněný polštářek. [22]

7.3 Výpočet a klasifikace

Pro každý soubor pěti zkušebních těles se vypočte souhrnná doba samovolného plamenného hoření t_f .

$$t_f = \sum_{i=1}^5 (t_{1,i} + t_{2,i})$$

kde: t_f je souhrnná doba samovolného plamenného hoření,

t_1 je doba prvního samovolného plamenného hoření i -tého vzorku,

t_2 je doba druhého samovolného plamenného hoření i -tého vzorku. [22]

Podle kritérií uvedených v následující tabulce se materiálu přiřadí stupeň hořlavosti V-0, V-1 a V-2.

Tabulka 12.:Kritéria pro stanovení hořlavosti dle ČSN EN 60695-11-10 [22]

Kritérium	Třída hořlavosti		
	V-0	V-1	V-2
Doba samovolného plamenného hoření (t_1 a t_2) pro jednotlivé vzorky	≤ 10 s	≤ 30 s	≤ 30 s
Souhrnná doba plamenného hoření t_f	≤ 50 s	≤ 250 s	≤ 250 s
Součet doby samovolného plamenného hoření a doby samovolného žhnutí po druhém přiložení plamene (t_2+t_3) pro jednotlivé vzorky	≤ 30 s	≤ 60 s	≤ 60 s
Opal žhavením nebo plamenem až k přidržené svorce	ne	ne	ne
Vznícení vrstvy vaty hořlavě okapávajícími částicemi	ne	ne	ano

7.4 Naměřená data a vyhodnocení

V tabulkách 13 – 30 jsou zachyceny naměřená data pro hořlavost.

Tabulka 13.: Naměřená hořlavost pro čisté LDPE a směsi s retardéry

Vzorek	LDPE pure					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhověl	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	26% Exolite + 0% nanoplňiva					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	29% ADK + 0% nanoplňiva					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		

kde: t_f je souhrnná doba samovolného plamenného hoření,
 t_1 je doba prvního samovolného plamenného hoření i-tého vzorku,
 t_2 je doba druhého samovolného plamenného hoření i-tého vzorku,
 t_3 je doba samovolného žhnutí.

Z tabulky 13. je patrné, že retardér ADK má lepší retardační schopnosti než retardér Exolite, protože dosáhl klasifikace V-0. Naopak u retardéru Exolite, v klasifikaci V-2, bylo možné vidět synergismus s plnivem.

Tabulka 14.: Hořlavost pro směsi LDPE/ POSS 1/Exolite

Vzorek	26% Exolite + 0% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% Exolite + 1% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	20
2.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	2	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	23% Exolite + 3% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	3	26	0	neskapává, nezapálil vatu	V-1	70
2.	3	8	0	odkapává, nezapálil vatu		
3.	3	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	3	7	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	2	11	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	13% Exolite + 3% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% Exolite + 3% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Synergismus vykázaly směsi s nanoplňivem POSS 1 s retardérem Exolite. Z tabulky 14 je vidět, že přidáním pouze 1 % plniva POSS 1 se dosáhlo zlepšení klasifikace z V-2 až na klasifikaci V-0. Další směs (23 % Exolite + 3 % POSS 1) také vykázala určité zlepšení, dosáhla klasifikace V-1. Další směsi již neprošly testem.

Tabulka 15.: Hořlavost pro směsi LDPE/POSS 1/ADK

Vzorek	29% ADK + 0% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	29% ADK + 1% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	1	5	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	34
2.	2	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	2	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	3	7	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	3	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% ADK + 3% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	8	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-1	64
2.	5	8	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	7	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	6	13	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	5	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	15% ADK + 3% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% ADK + 3% POSS 1					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

U retardéru ADK jsme sice dosáhli klasifikace V-0 přidáním 1 % POSS 2, když se ale podíváme na souhrnnou dobu plamenného hoření t_f , je vidět určité zhoršení. Proto lze usoudit, že v rámci této série vzorků (POSS 1 + ADK) nedošlo k žádným synergickým účinkům, naopak přidáním nanoplňiva se odolnost proti hoření mírně zhoršila.

Tabulka 16.: Hořlavost pro směsi LDPE/POSS 2/Exolite

Vzorek	26% Exolite + 0% POSS 2					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% Exolite + 1% POSS 2					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	1	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-1	34
2.	1	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	4	6	0	odkapává, nezapálil vatu		
4.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	6	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	23% Exolite + 3% POSS 2					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	8	5	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	120
2.	6	28	0	odkapává, nezapálil vatu		
3.	12	11	0	odkapává, nezapálil vatu		
4.	7	16	0	odkapává a zapaluje vatu		
5.	7	20	0	odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	13% Exolite + 3% POSS 2					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% Exolite + 3% POSS 2					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Synergismus vykázaly směsi s nanoplňivem POSS 2 s retardérem Exolite. Z tabulky 16. je vidět, že přidáním 1 % plniva POSS 2 se dosáhlo zlepšení klasifikace z V-2 na klasifikaci V-1. U další směsi (23 % Exolite + 3 % POSS 2) se sice dosahuje stejné klasifikace, ale podle t_f došlo ke zhoršení odolnosti proti hoření. Další vzorky již nevyhověly.

Tabulka 17.: Hořlavost pro směsi LDPE/POSS 2/ADK

Vzorek	29% ADK + 0% POSS 2						
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13	
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu			
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu			
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu			
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu			
Vzorek	29% ADK + 1% POSS 2						
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	26	
2.	1	4	0	neskapává, nezapálil vatu			
3.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu			
4.	2	7	0	neskapává, nezapálil vatu			
5.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu			
Vzorek	26% ADK + 3% POSS 2						
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	1	5	0	neskapává, nezapálil vatu	V-1	40	
2.	2	6	0	neskapává, nezapálil vatu			
3.	2	11	0	neskapává, nezapálil vatu			
4.	2	7	0	neskapává, nezapálil vatu			
5.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu			
Vzorek	15% ADK + 3% POSS2						
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	3	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-	
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
Vzorek	0% ADK + 3% POSS 2						
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-	
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			

Tabulka 18.: Hořlavost pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)/Exolite

26% Exolite + 0% Dragonite (koncentrát)						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vatu		
26% Exolite + 1% Dragonite (koncentrát)						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	2	20	0	neskapává, nezapálil vatu	V-1	46
2.	2	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	6	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	6	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
23% Exolite + 3% Dragonite (koncentrát)						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	1	10	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	51
2.	1	15	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
3.	2	12	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
13% Exolite + 3% Dragonite (koncentrát)						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	0
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
0% Exolite + 3% Dragonite (koncentrát)						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Tabulka 19.: Hořlavost pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)/ADK

Vzorek	29% ADK + 0% Dragonite (koncentrát)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	29% ADK + 1% Dragonite (koncentrát)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	22
2.	1	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	2	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% ADK + 3% Dragonite (koncentrát)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	1	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	1	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	1	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	1	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	1	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	15% ADK + 13% Dragonite (koncentrát)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	2	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% ADK + 3% Dragonite (koncentrát)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Tabulka 20.: Hořlavost pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)/Exolite

Vzorek	26% Exolite + 0% Dragonite (prášek)					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% Exolite + 1% Dragonite (prášek)					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	2	7	0	odkapává, zapálil vatu	V-2	47
2.	2	12	0	odkapává, zapálil vatu		
3.	1	7	0	odkapává, zapálil vatu		
4.	2	7	0	odkapává, zapálil vatu		
5.	2	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	23% Exolite + 3% Dragonite (prášek)					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	7	7	0	odkapává, zapálil vatu	V-2	80
2.	5	12	0	odkapává, zapálil vatu		
3.	6	8	0	odkapává, zapálil vatu		
4.	4	10	0	odkapává, zapálil vatu		
5.	15	6	0	odkapává, zapálil vatu		
Vzorek	13% Exolite + 3% Dragonite (prášek)					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% Exolite + 3% Dragonite (prášek)					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Tabulka 21.: Hořlavost pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)/ADK

Vzorek	29% ADK + 0% Dragonite (prášek)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	29% ADK + 1% Dragonite (prášek)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	27
2.	1	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	2	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	2	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% ADK + 3% Dragonite (prášek)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	4	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	V-2	29
2.	3	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	2	12	0	odkapává, zapálil vatu		
4.	3	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	5	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	15% ADK + 3% Dragonite (prášek)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% ADK + 3% Dragonite (prášek)					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Tabulka 22.: Hořlavost pro směsi LDPE/ Pangel /Exolite

Vzorek	26% Exolite + 0% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% Exolite + 1% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	2	11	0	odkapává, zapálil vatu	V-2	59
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	2	8	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	2	23	0	odkapává, zapálil vatu		
5.	2	7	0	odkapává, zapálil vatu		
Vzorek	23% Exolite + 3% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	29	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	13% Exolite + 3% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% Exolite + 3% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Tabulka 23.: Hořlavost pro směsi LDPE/Pangel/ADK

Vzorek	29% ADK + 0% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	29% ADK + 1% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	21
2.	2	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	2	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% ADK + 3% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	2	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-1	54
2.	1	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	3	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	5	8	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	5	14	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	15% ADK + 3% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% ADK + 3% Pangel					
tělisko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Tabulka 24.: Hořlavost pro směsi LDPE/Perkalite/Exolite

Vzorek	26% Exolite + 0% Perkalite					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vatu (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% Exolite + 1% Perkalite					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	1	13	0	odkapává, nezapálil vatu	V-1	37
2.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	2	8	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	23% Exolite + 3% Perkalite					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	16	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	15	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	13% Exolite + 3% Perkalite					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% Exolite + 3% Perkalite					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Tabulka 25.: Hořlavost pro směsi LDPE/Perkalite/ADK

Vzorek	29% ADK + 0% Perkalite						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13	
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu			
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu			
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu			
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu			
Vzorek	29% ADK + 1% Perkalite						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	15	
2.	1	3	0	neskapává, nezapálil vatu			
3.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu			
4.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu			
5.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu			
Vzorek	26% ADK + 3% Perkalite						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	3	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-1	52	
2.	6	9	0	neskapává, nezapálil vatu			
3.	1	4	0	neskapává, nezapálil vatu			
4.	4	9	0	neskapává, nezapálil vatu			
5.	3	11	0	neskapává, nezapálil vatu			
Vzorek	15% ADK + 3% Perkalite						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-	
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
Vzorek	0% ADK + 3% Perkalite						
tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]	
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-	
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu			

Tabulka 26.: Hořlavost pro směsi LDPE/Grafmax/Exolite

Vzorek	26% Exolite + 0% Grafmax					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vat	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vat (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vat (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vat (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vat		
Vzorek	26% Exolite + 1% Grafmax					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	1	4	0	neskapává, nezapálil vat	V-1	38
2.	1	2	0	neskapává, nezapálil vat		
3.	1	8	0	odkapává, nezapálil vat		
4.	2	2	0	neskapává, nezapálil vat		
5.	1	16	0	neskapává, nezapálil vat		
Vzorek	23% Exolite + 3% Grafmax					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
Vzorek	13% Exolite + 3% Grafmax					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
Vzorek	0% Exolite + 3% Grafmax					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vat		

Tabulka 27.: Hořlavost pro směsi LDPE/Grafmax/ADK

Vzorek	29% ADK + 0% Grafmax					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	29% ADK + 1% Grafmax					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu	V-2	55
2.	3	26	0	odkapává a zapaluje vatu		
3.	1	12	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	4	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	5	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	26% ADK + 3% Grafmax					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	1	12	0	odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	2	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	3	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	2	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	2	≥ 30	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	15% ADK + 3% Grafmax					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
Vzorek	0% ADK + 3% Grafmax					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu		

Tabulka 28.: Hořlavost pro směsi LDPE/Nanocyl/Exolite

Vzorek	26% Exolite + 0% Nanocyl					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	3	6	0	neskapává, nezapálil vatou	V-2	56
2.	2	8	0	odkapává, zapálil vatou (odtavila se hořící část)		
3.	1	9	0	odkapává, zapálil vatou (odtavila se hořící část)		
4.	3	6	0	odkapává, zapálil vatou (odtavila se hořící část)		
5.	2	16	0	neskapává, nezapálil vatou		
Vzorek	26% Exolite + 1% Nanocyl					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
3.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
4.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
5.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
Vzorek	23% Exolite + 3% Nanocyl					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
3.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
4.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
5.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
Vzorek	13% Exolite + 3% Nanocyl					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatou, kouř	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatou, kouř		
3.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatou, kouř		
4.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatou, kouř		
5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatou, kouř		
Vzorek	0% Exolite + 3% Nanocyl					
tělisko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem		
3.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem		
4.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem		
5.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem		

Tabulka 29.: Hořlavost pro směsi LDPE/Nanocyl/ADK

Vzorek	29% ADK + 0% Nanocyl					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	2	2	0	neskapává, nezapálil vatu	V-0	13
2.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
3.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
4.	1	2	0	neskapává, nezapálil vatu		
5.	1	1	0	neskapává, nezapálil vatu		
Vzorek	29% ADK + 1% Nanocyl					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
3.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
4.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
5.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
Vzorek	26% ADK + 3% Nanocyl					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
3.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
4.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
5.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
Vzorek	15% ADK + 3% Nanocyl					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
3.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
4.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
5.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, větší vývin kouře		
Vzorek	0% ADK + 3% Nanocyl					
tělísko	t₁ [s]	t₂ [s]	t₃ [s]	popis	skupina	t_f [s]
1.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem	Nevyhovuje	-
2.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem		
3.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem		
4.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem		
5.	≥ 30	-	-	hoří, neodkapává, čadí bílým kouřem		

Tabulka 30.: Hořlavost pro nanokompozity s matricí PLA

tělísko	t ₁ [s]	t ₂ [s]	t ₃ [s]	popis	skupina	t _f [s]
PLA pure						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Na+ 1 %						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Na+ 3 %						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Na+ 5 %						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Bio100						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Na+/Bio100						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/10A/Bio100						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Bio500						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Na+/Bio500						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Nanofil						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/30B						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/20A						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/10A						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/3010						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-
PLA/Garamite						
1.-5.	≥ 30	-	-	hoří, odkapává a zapaluje vatu	nevyhovuje	-

Bohužel zvolenou metodou pro stanovení hořlavosti polymerů ČSN EN 60695-11-10 žádný ze vzorků PLA nanokompozitů neprošel. Všechny vzorky velmi dobře hořely, po prvním zapálení vůbec nezhasínaly a hoření bylo agresivní s rychlým odkapáváním hořících částí, které okamžitě zapalovaly buničinu. U PLA směsi nebylo možné spočítat souhrnnou dobu samovolného plamenného hoření.

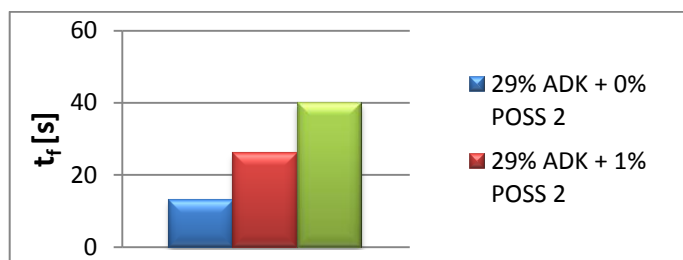
7.5 Shrnutí

Výsledky pro nanokompozity LDPE vykazaly určitý synergický účinek u nanoplňiv POSS 1, POSS 2 a Dragonite (koncentrát), Perkalite a Grafmax v kombinaci s retardérem Exolite. Synergismu byl u některých typů nanoplňiv pozorovatelný pouze díky parametru

t_f . U retardéru ADK docházelo u většiny testovaných materiálů ke zhoršení, což bylo možné pozorovat pomocí parametru t_f . Vzorky LDPE/Nanocyl/ADK vykázaly zlepšení v případě odkapávání materiálu. Přestože vzorky zkouškou neprošly, protože po prvním zapálení samovolně hořely, nedocházelo k odkapávání hořícího materiálu. Tento jev mohl být způsoben zvýšením viskozity. Všechny vzorky s nízkým obsahem retardérů (13 % Exolitu a 15 % ADK) a bez obsahu retardérů zkouškou neprošly.

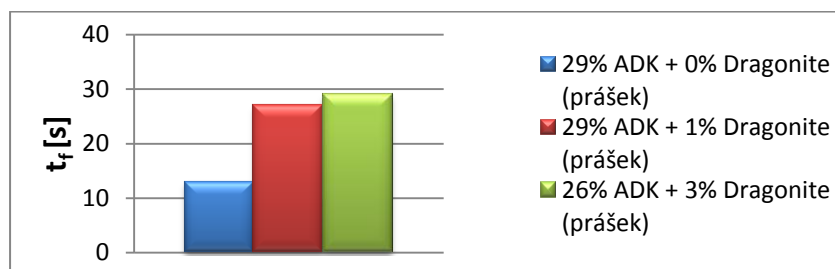
V grafu 1. je srovnání t_f pro 3 směsi LDPE/POSS2/ADK. Obě směsi s 29 % ADK dosáhli klasifikace V-0, přesto je v grafu vidět zhoršení podle t_f již při přidavku 1 % POSS 2. Třetí směs z grafu 26 % ADK + 3 % POSS 2 dosáhla klasifikace V-1.

V grafu 1. je srovnání t_f pro 3 směsi LDPE/POSS 2/ADK. Zbývající 2 směsi již testem neprošly. Obě směsi s 29 % ADK dosáhli klasifikace V-0, přesto je v grafu vidět zhoršení podle t_f již při přidavku 1 % POSS 2. Třetí směs z grafu 26 % ADK + 3 % POSS 2 dosáhla klasifikace V-1.



Graf 1.: Rozdíl t_f pro směsi LDPE/POSS 2/ADK

Obdobné je to i v grafu 2. První dva vzorky s 29 % ADK dosáhli skupiny V-0, přesto u směsi 29 % ADK + 1 % Dragonite (prášek) došlo ke zhoršení t_f . Třetí vzorek 26 % ADK + 3 % Dragonite (prášek) byl klasifikován skupinou V-2.



Graf 2.: Rozdíl t_f pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)/ADK

8 MECHANICKÉ VLASTNOSTI – TAHOVÉ ZKOUŠKY

V souladu s cíli diplomové práce byly dále testovány mechanické vlastnosti nanokompozitů pomocí tahové zkoušky. Zkouška byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 527.

Podstatou zkoušky je protahování zkušební tělesa upevněného v čelistech ve směru své hlavní podélné osy konstantní zkušební rychlostí do jeho porušení nebo do okamžiku, kdy napětí (zatížení) nebo deformace (prodloužení) dosáhnou předem zvolené hodnoty. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení. Výsledkem je tahová křivka. Zkušební tělíska mohou být obráběná, lisovaná, vstříkovaná nebo vysekávaná z desek či folií. [39,40]

V této diplomové práci jsou prezentovány pouze výsledky tahové zkoušky kompozitů/nanokompozitů na základě LDPE. PLA směsi byly testovány v rámci jiné diplomové práce: Jiří Šmotek, Biodegradovatelné nanokompozitní materiály, DP, UTB FT, 2013.

8.1 Příprava zkušebních tělísek

Tělíska tvaru oboustranných lopatek byla vyseknuta na hydraulickém vysekávacím stroji z lisovaných destiček. Rozměry zkušebních tělísek jsme volili podle normy ČSN EN ISO 527-2 a typu tělísek 5A. Pro každou směs bylo připraveno 7 tělísek (5 tělísek k měření a 2 náhradní).

8.2 Podmínky měření

Vlastní měření bylo provedeno na stroji firmy Alpha Technologies, Tenzometr 2000. Měření probíhalo ve 2 krocích: 1 mm/min do prodloužení 0,75 % a dále 100 mm/min až do přetržení. Vlastní zkoušku jsme provedli na 5 tělískách pro každou směs.

8.3 Naměřená data a vyhodnocení

V následujících tabulkách jsou zobrazeny průměrné hodnoty pevnosti v tahu, prodloužení a E-modulu získaná z tahové zkoušky pro testované materiály.

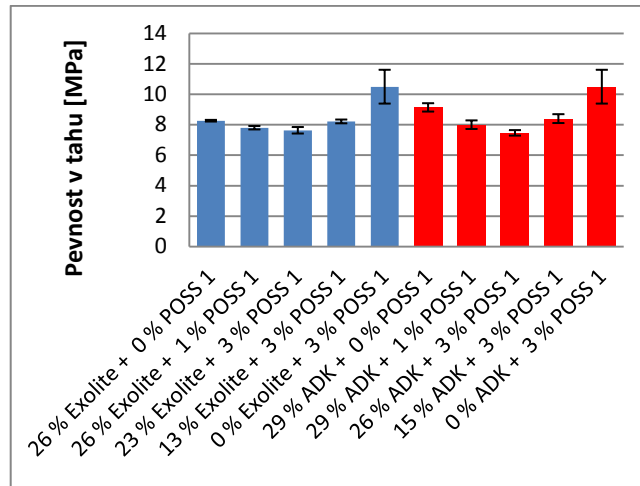
Tabulka 31.: Mechanické vlastnosti pro čisté LDPE a směsi s retardéry

Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
čisté LDPE	Průměr	13,2938	528,1040	258,6740
	Odchylka	0,6883	48,2336	97,2200
26 % Exolite + 0 % Nanoplňiva	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
29 % ADK + 0 % Nanoplňiva	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264

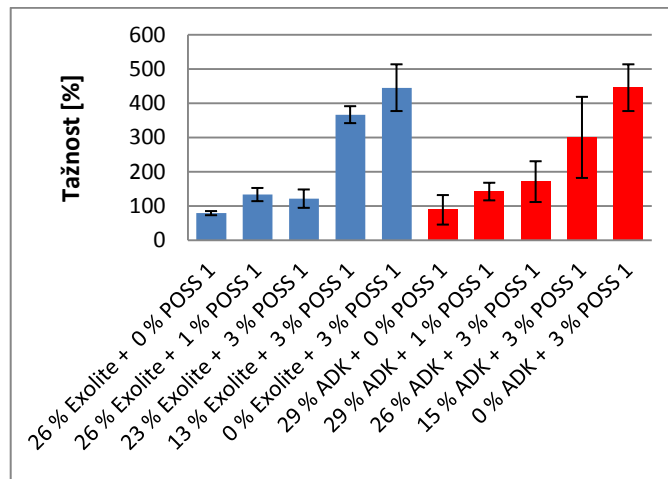
V následujících tabulkách jsou naměřená data pro směsi s oběma retardéry a nanoplňivy.

Tabulka 32.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/POSS 1

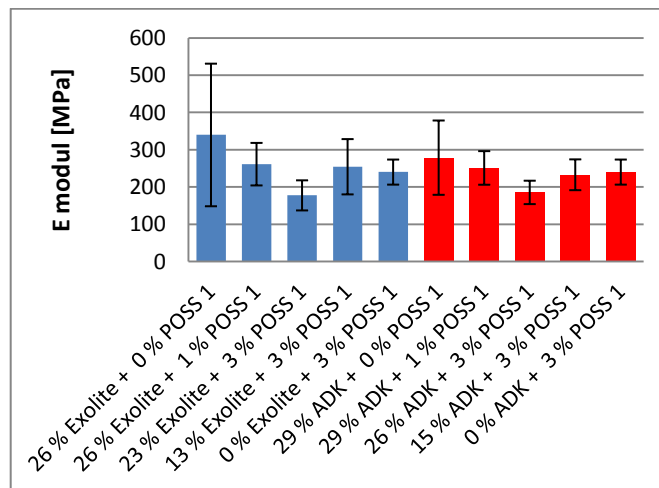
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
26 % Exolite + 0 % POSS 1	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
26 % Exolite + 1 % POSS 1	Průměr	7,8012	133,1260	261,5680
	Odchylka	0,1129	19,2528	57,0620
23 % Exolite + 3 % POSS 1	Průměr	7,6324	121,2010	177,8080
	Odchylka	0,2123	26,8735	40,3588
13 % Exolite + 3 % POSS 1	Průměr	8,2126	366,6760	254,6500
	Odchylka	0,1243	24,7489	74,2036
0 % Exolite + 3 % POSS 1	Průměr	10,4952	445,5020	240,3060
	Odchylka	1,1093	68,2589	33,6452
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
29 % ADK + 0 % POSS 1	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264
29 % ADK + 1 % POSS 1	Průměr	7,9994	141,8740	251,4800
	Odchylka	0,2819	25,7036	45,1107
26 % ADK + 3 % POSS 1	Průměr	7,4636	170,9500	185,7760
	Odchylka	0,1809	59,5822	31,4032
15 % ADK + 3 % POSS 1	Průměr	8,3988	300,2020	233,0920
	Odchylka	0,2903	118,4762	41,334
0 % ADK + 3 % POSS 1	Průměr	10,4952	445,5020	240,3060
	Odchylka	1,1093	68,2589	33,6452



Graf 3.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/POSS 1



Graf 4.: Tažnost pro směsi LDPE/POSS 1



Graf 5.: E modul pro směsi LDPE/POSS 1

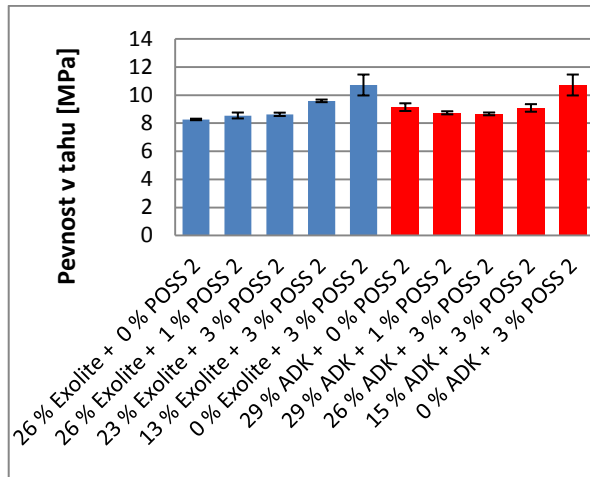
Pevnost v tahu klesá do střední koncentrace (23 % Exolite + 3 % POSS 1 a 26 % ADK + 3 % POSS 1), od této dál roste. Průběh je stejný u obou retardérů (graf 3.).

Tažnost (graf 4.) roste v obou případech, výjimka je u 23 % Exolite + 3 % POSS 1, kdy tažnost proti předchozí hodnotě mírně klesne, následně znovu stoupá.

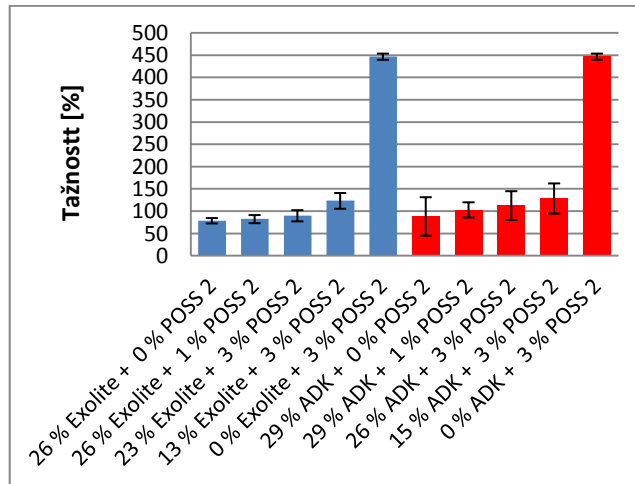
Modul (graf 5.) má obdobný průběh jako pevnost v tahu, kdy klesá do středních hodnot a dál poté roste.

Tabulka 33.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/POSS 2

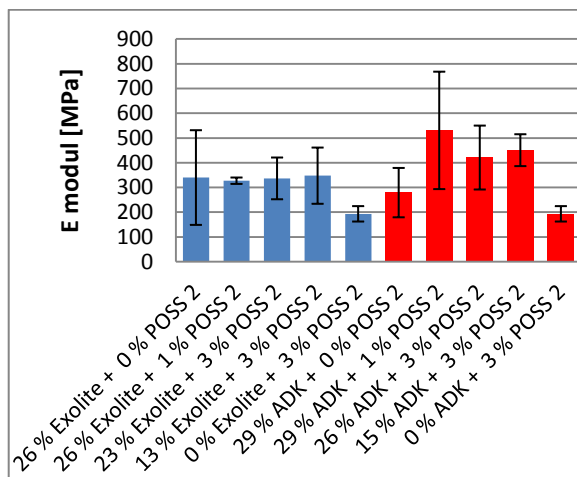
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
26 % Exolite + 0 % POSS 2	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
26 % Exolite + 1 % POSS 2	Průměr	8,5422	82,5250	327,1440
	Odchylka	0,2110	9,1318	12,9261
23 % Exolite + 3 % POSS 2	Průměr	8,6238	90,0760	336,5760
	Odchylka	0,1195	12,5218	84,3420
13 % Exolite + 3 % POSS 2	Průměr	9,5828	123,4530	347,4880
	Odchylka	0,0923	17,6629	113,6509
0 % Exolite + 3 % POSS 2	Průměr	10,7124	446,8280	193,3560
	Odchylka	0,7446	6,9273	31,1599
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
29 % ADK + 0 % POSS 2	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264
29 % ADK + 1 % POSS 2	Průměr	8,7328	103,1010	530,5800
	Odchylka	0,1099	17,1151	237,3423
26 % ADK + 3 % POSS 2	Průměr	8,6552	112,8770	420,8000
	Odchylka	0,1002	32,3210	129,1537
15 % ADK + 3 % POSS 2	Průměr	9,0802	128,8250	450,6060
	Odchylka	0,2701	33,7889	64,4424
0 % ADK + 3 % POSS 2	Průměr	10,7124	446,8280	193,3560
	Odchylka	0,7446	6,9273	31,1599



Graf 6.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/POSS 2



Graf 7.: Tažnost pro směsi LDPE/POSS 2



Graf 8.: E modul pro směsi LDPE/POSS 2

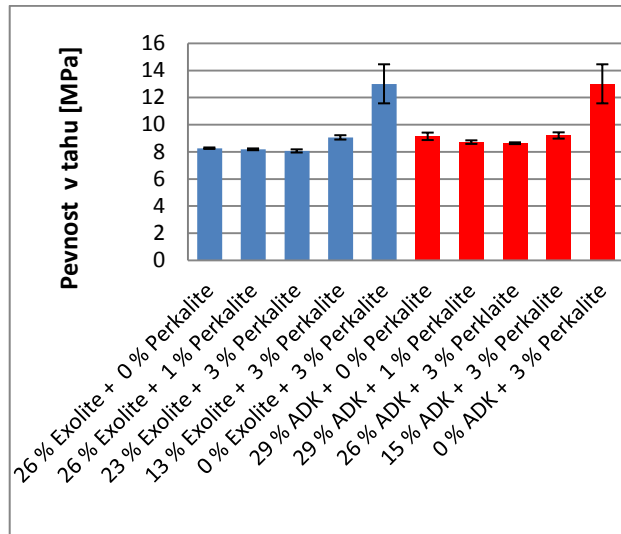
Pevnost v tahu (graf 6.) pro směsi Exolitu roste s přidavkem nanoplňiva. U směsi s ADK klesá do střední koncentrace standardního retardéru (26 % ADK 3 % POSS 2) a následně roste.

Tažnost v přítomnosti obou retardérů roste s klesající mírou plnění standardním retardérem (graf 7.).

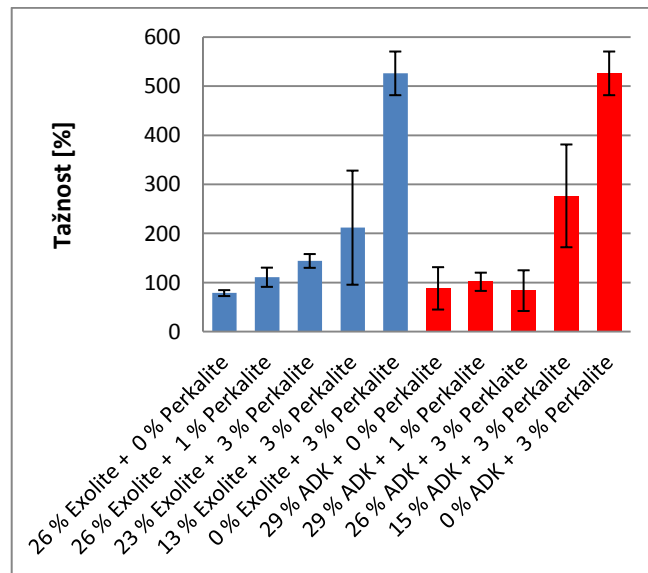
Směsi LDPE/POSS2/Exolite vykazují malou změnu oproti srovnávacímu materiálu. U směsi LDPE/POSS2/ADK je předpoklad růstu do plnění 15 % ADK + 3 % POSS 2 a dále klesá.

Tabulka 34.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Perkalite

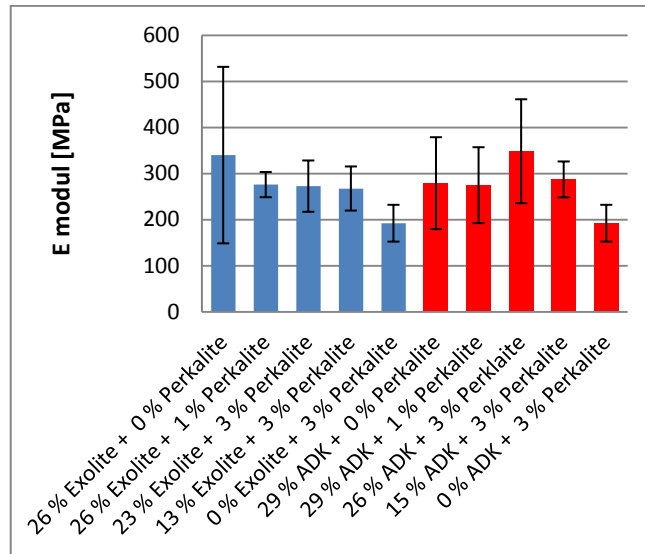
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
26 % Exolite + 0 % Perkalite	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
26 % Exolite + 1 % Perkalite	Průměr	8,1780	111,1270	276,0120
	Odchylka	0,0663	19,5478	27,3357
23 % Exolite + 3 % Perkalite	Průměr	8,0590	144,3460	272,6840
	Odchylka	0,1165	14,0261	55,6257
13 % Exolite + 3 % Perkalite	Průměr	9,0588	212,0780	267,5200
	Odchylka	0,1590	116,1636	47,8532
0 % Exolite + 3 % Perkalite	Průměr	13,0076	526,3020	192,2720
	Odchylka	1,4397	44,4369	39,9206
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
29 % ADK + 0 % Perkalite	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264
29 % ADK + 1 % Perkalite	Průměr	8,7084	101,9020	274,7540
	Odchylka	0,1319	18,5789	82,2999
26 % ADK + 3 % Perkalite	Průměr	8,6286	83,8750	348,3160
	Odchylka	0,0649	41,4555	112,7338
15 % ADK + 3 % Perkalite	Průměr	9,1998	276,8780	287,2580
	Odchylka	0,2311	104,6166	38,9129
0 % ADK + 3 % Perkalite	Průměr	13,0076	526,3020	192,2720
	Odchylka	1,4397	44,4369	39,9206



Graf 9.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Perkalite



Graf 10.: Tažnost pro směsi LDPE/Perkalite

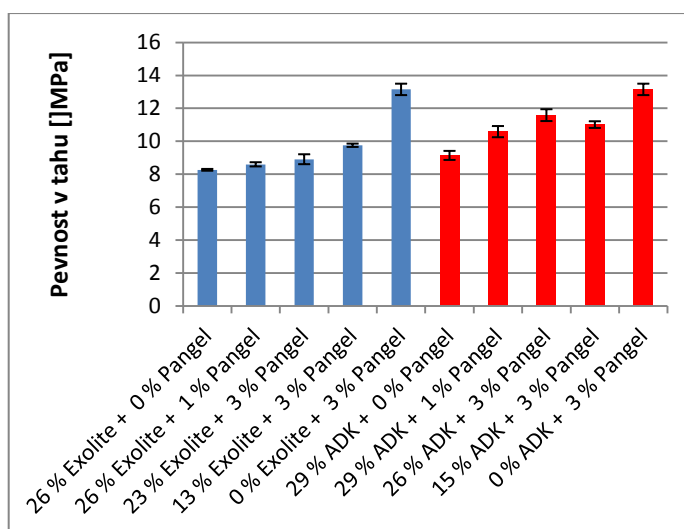


Graf 11.: E modul pro směsi LDPE/Perkalite

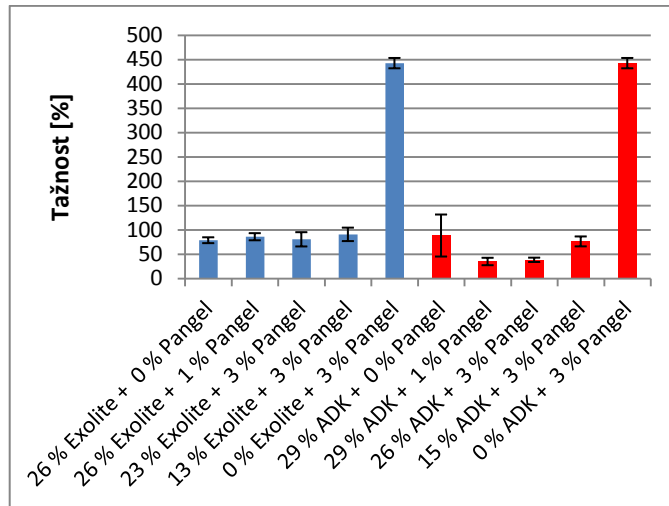
Pevnost v tahu podle grafu 9. pro směsi LDPE/Perkalite roste s klesající koncentrací retardéru Exolite a ADK. Tažnost v grafu 10. má také rostoucí trend. U E modulu (graf 11.) pro směsi LDPE/Perkalite/Exolite se předpokládá klesající tendence v závislosti na plnění Perkalitem. U směsí s ADK nedošlo k výrazné změně E modulu. Kromě vzorku s 26% ADK + 3 % Perkalite.

Tabulka 35.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Pangel

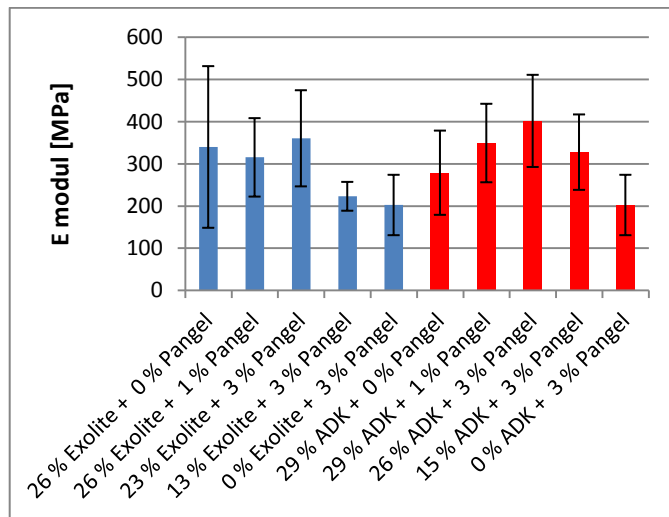
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
26 % Exolite + 0 % Pangel	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
26 % Exolite + 1 % Pangel	Průměr	8,5946	86,0750	315,3800
	Odchylka	0,1273	7,3138	92,8614
23 % Exolite + 3 % Pangel	Průměr	8,9044	80,7500	360,4980
	Odchylka	0,3013	14,6580	113,7785
13 % Exolite + 3 % Pangel	Průměr	9,7526	90,9000	223,1780
	Odchylka	0,1005	13,7862	34,1192
0 % Exolite + 3 % Pangel	Průměr	13,1462	442,6260	202,6420
	Odchylka	0,3471	10,6070	71,496
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
29 % ADK + 0 % Pangel	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264
29 % ADK + 1 % Pangel	Průměr	10,5810	35,1750	349,3300
	Odchylka	0,3388	7,6152	92,8810
26 % ADK + 3 % Pangel	Průměr	11,5834	38,6000	401,7340
	Odchylka	0,3594	4,4556	109,0890
15 % ADK + 3 % Pangel	Průměr	11,0078	76,4500	327,7360
	Odchylka	0,2029	10,2019	89,3036
0 % ADK + 3 % Pangel	Průměr	13,1462	442,6260	202,6420
	Odchylka	0,3471	10,6070	71,496



Graf 12.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Pangel



Graf 13.: Tažnosti pro směsi LDPE/Pangel

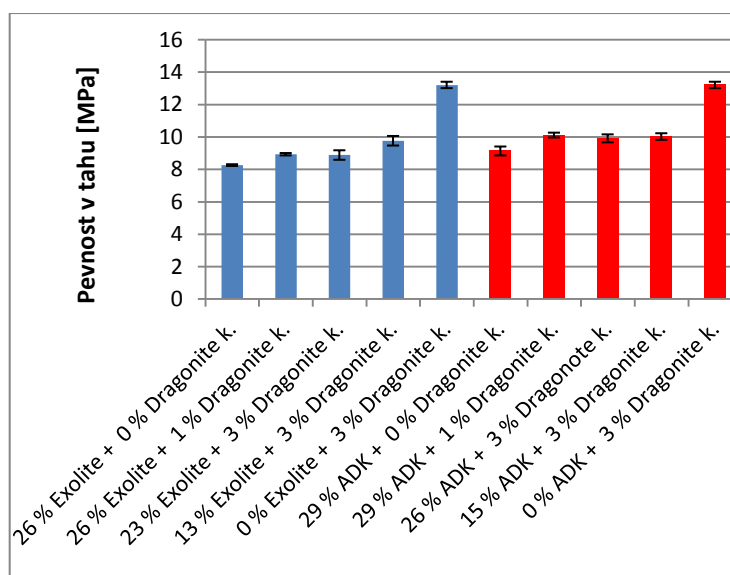


Graf 14.: E modul pro směsi LDPE/Pangel

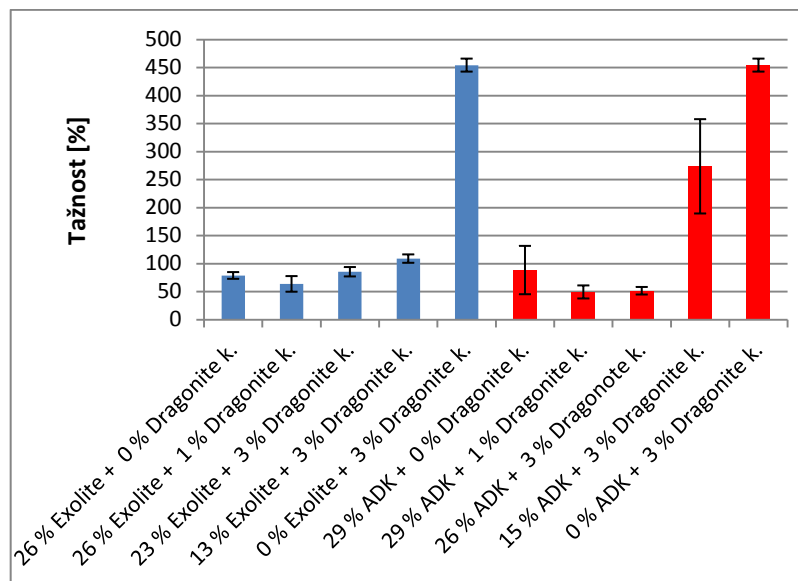
Pevnost v tahu roste s klesající koncentrací retardéru Exolite a ADK (graf 12.) pro směsi LDPE/Pangel. E modul pro směsi LDPE/Pangel/Exolite vykazuje klesající trend (graf 14.). U směsi LDPE/Pangel/Exolite lze sledovat maximum u plnění 26 % ADK + 3 % Pangel.

Tabulka 36.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)

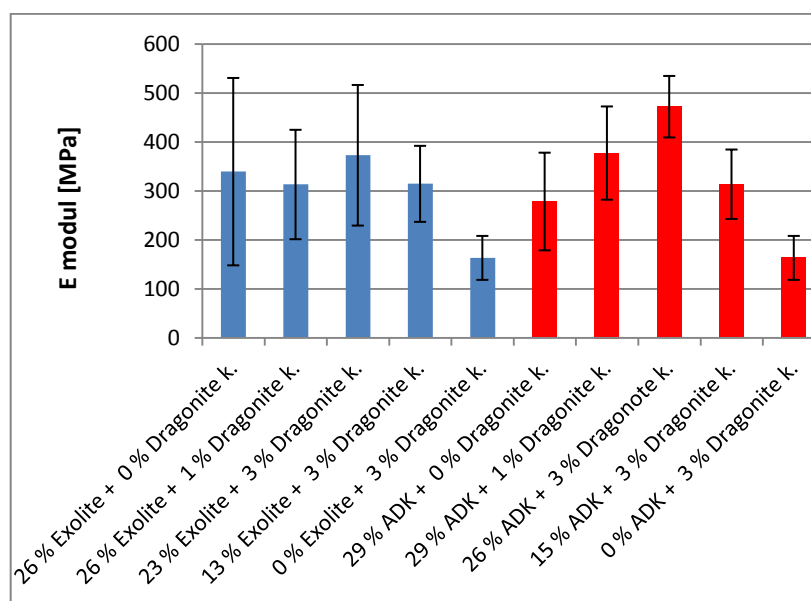
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
26 % Exolite + 0 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
26 % Exolite + 1 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	8,9332	63,8250	313,7000
	Odchylka	0,0732	13,9512	111,7298
23 % Exolite + 3 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	8,8844	85,5250	373,4620
	Odchylka	0,2942	8,3641	143,5904
13 % Exolite + 3 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	9,7648	108,9780	315,0580
	Odchylka	0,2956	7,4882	77,6621
0 % Exolite + 3 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	13,2084	454,4020	163,7920
	Odchylka	0,1968	11,6089	44,8896
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
29 % ADK + 0 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264
29 % ADK + 1 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	10,1154	49,4500	377,9300
	Odchylka	0,1492	11,6272	95,2396
26 % ADK + 3 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	9,9122	51,6000	472,7100
	Odchylka	0,2465	6,7506	62,8254
15 % ADK + 3 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	10,0254	273,7260	314,3020
	Odchylka	0,2032	84,1882	70,8956
0 % ADK + 3 % Dragonite (koncentrát)	Průměr	13,2084	454,4020	163,7920
	Odchylka	0,1968	11,6089	44,8896



Graf 15.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)



Graf 16.: Tažnost pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)

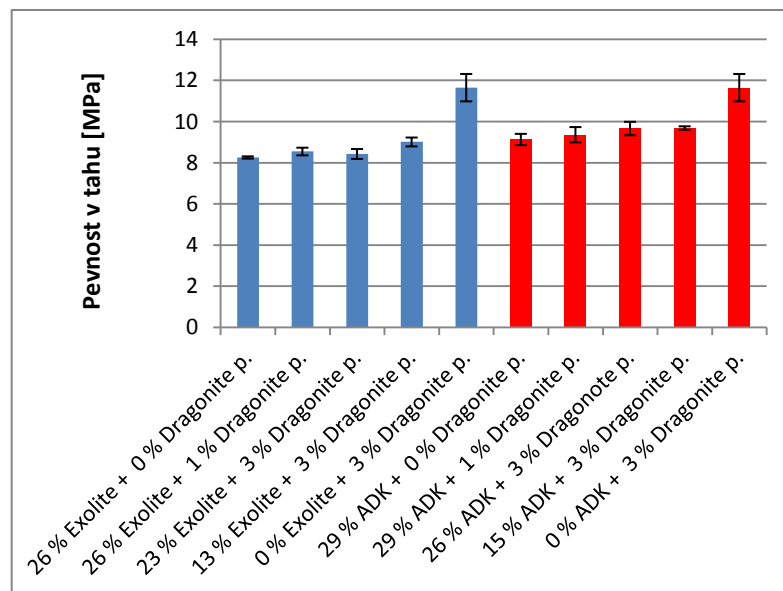


Graf 17.: E modul pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)

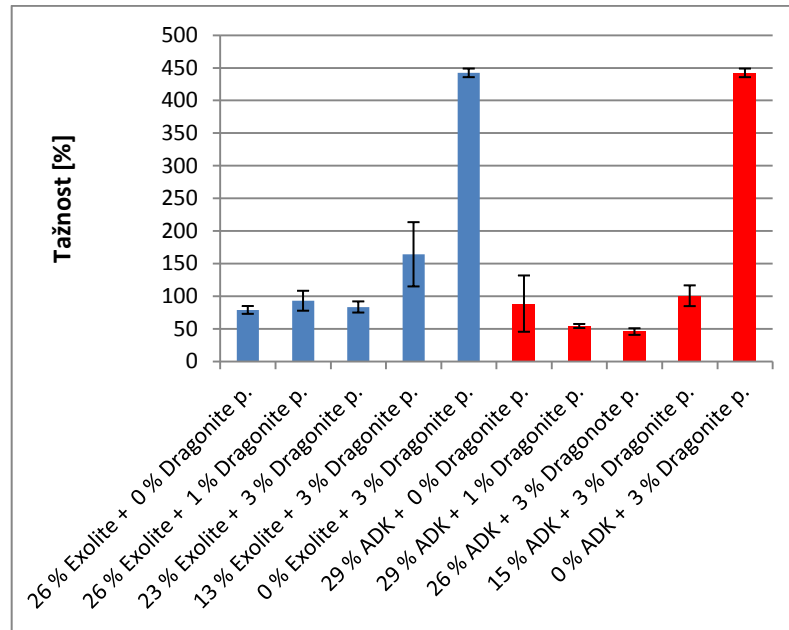
Pevnost v tahu má rostoucí trend s klesajícím plněním retardéru Exolite a ADK (graf 15.). Stejný trend je pozorován u tažnosti s výjimkou vzorků s 26 % Exolite + 3 % Dragonite(koncentrát) a s 29% ADK + 3 % Dragonite(koncentrát), (graf 16.). E modul pro LDPE/Dragonite (koncentrát)/Exolite (graf 17.) má spíše klesající tendenci. U LDPE/Dragonite (koncentrát)/ADK bylo zaznamenáno maximum hodnot E modulu pro směs 26 % ADK + 3 % Dragonite (koncentrát).

Tabulka 37.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)

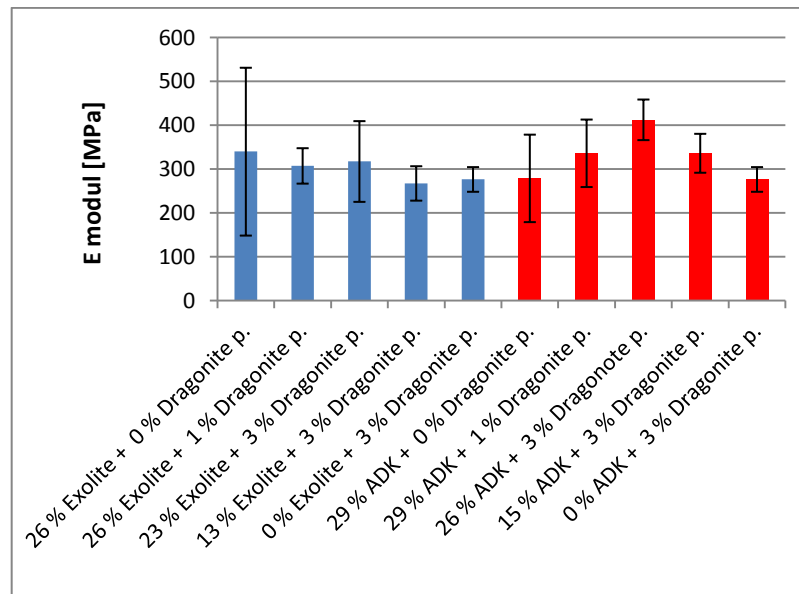
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
26 % Exolite + 0 % Dragonite (prášek)	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
26 % Exolite + 1 % Dragonite (prášek)	Průměr	8,5510	92,9510	226,9520
	Odchylka	0,1858	15,2587	40,4077
23 % Exolite + 3 % Dragonite (prášek)	Průměr	8,4312	83,4000	268,0860
	Odchylka	0,2404	8,5339	92,0684
13 % Exolite + 3 % Gragonite (prášek)	Průměr	9,0148	164,1530	251,2420
	Odchylka	0,2153	49,2739	39,2410
0 % Exolite + 3 % Dragonite (prášek)	Průměr	11,6536	442,2760	182,3480
	Odchylka	0,6655	6,5920	28,1129
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
29 % ADK + 0 % Dragonite (prášek)	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264
29 % ADK + 1 % Dragonite (prášek)	Průměr	9,3674	54,2250	319,8520
	Odchylka	0,3714	3,0978	76,9404
26 % ADK + 3 % Dragonite (prášek)	Průměr	9,6690	45,7000	181,682
	Odchylka	0,3255	5,0736	46,2724
15 % ADK + 3 % Dragonite (prášek)	Průměr	9,6906	100,6270	230,4220
	Odchylka	0,0849	15,9131	44,3563
0 % ADK + 3 % Dragonite (prášek)	Průměr	11,6536	442,2760	182,3480
	Odchylka	0,6655	6,5920	28,1129



Graf 18.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)



Graf 19.: Tažnost pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)

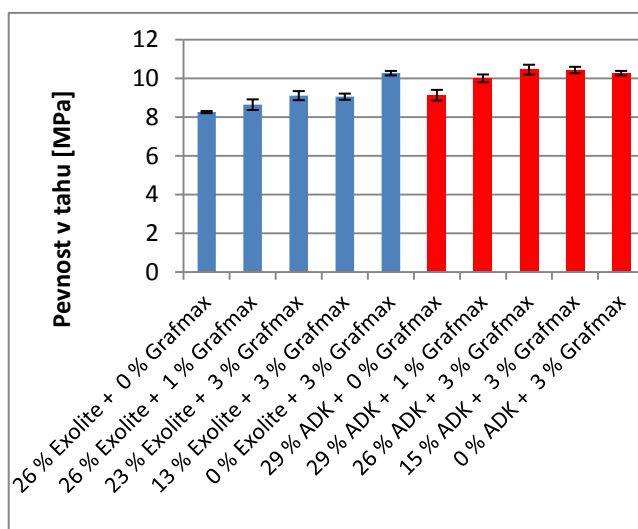


Graf 20.: E modul pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)

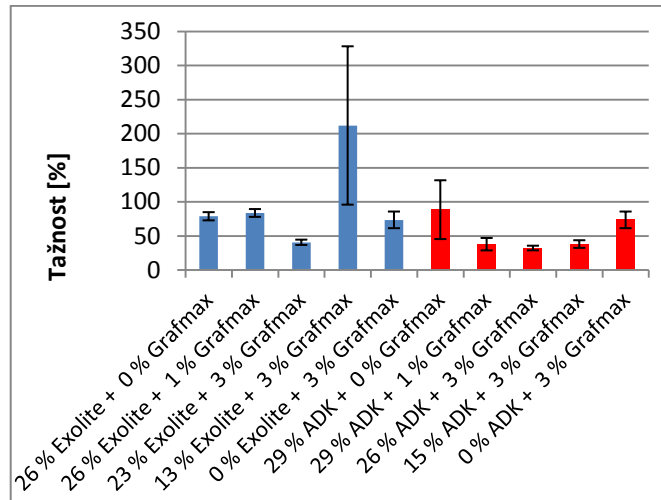
U Dragonite (prášek) má pevnost v tahu (graf 18.), tažnost (graf 19.) i E modul (graf 20.) podobné průběhy jako u Dragonitu (koncentrát).

Tabulka 38.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Grafmax

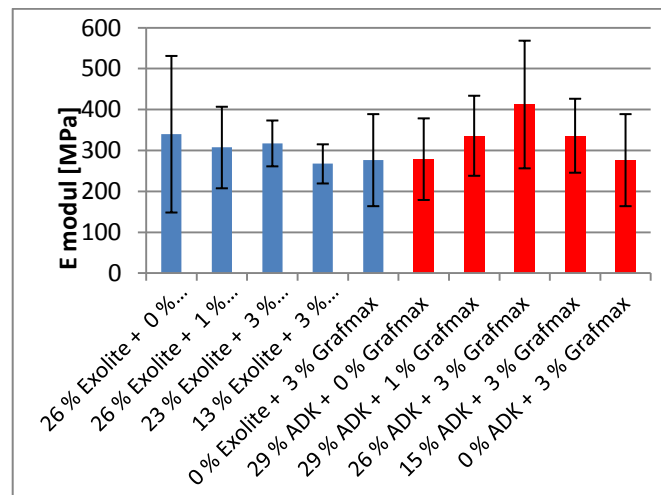
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
26 % Exolite + 0 % Grafmax	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
26 % Exolite + 1 % Grafmax	Průměr	8,6462	83,7000	307,4940
	Odchylka	0,2731	5,7220	99,6690
23 % Exolite + 3 % Grafmax	Průměr	9,1122	40,6500	317,5500
	Odchylka	0,2337	3,884	56,0424
13 % Exolite + 3 % Grafmax	Průměr	9,0588	212,0780	267,5200
	Odchylka	0,1590	116,1636	47,8532
0 % Exolite + 3 % Grafmax	Průměr	10,2720	73,6000	276,6380
	Odchylka	0,1166	12,2151	112,4755
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
29 % ADK + 0 % Grafmax	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264
29 % ADK + 1 % Grafmax	Průměr	10,0048	37,8750	336,2620
	Odchylka	0,1999	9,0895	97,8317
26 % ADK + 3 % Grafmax	Průměr	10,4546	32,2500	412,6040
	Odchylka	0,2531	3,4114	156,0166
15 % ADK + 3 % Grafmax	Průměr	10,4336	38,1000	336,2940
	Odchylka	0,1666	5,5982	90,3841
0 % ADK + 3 % Grafmax	Průměr	10,2720	73,6000	276,6380
	Odchylka	0,1166	12,2151	112,4755



Graf 21.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Grafmax



Graf 22.: Tažnost pro směsi LDPE/Grafmax

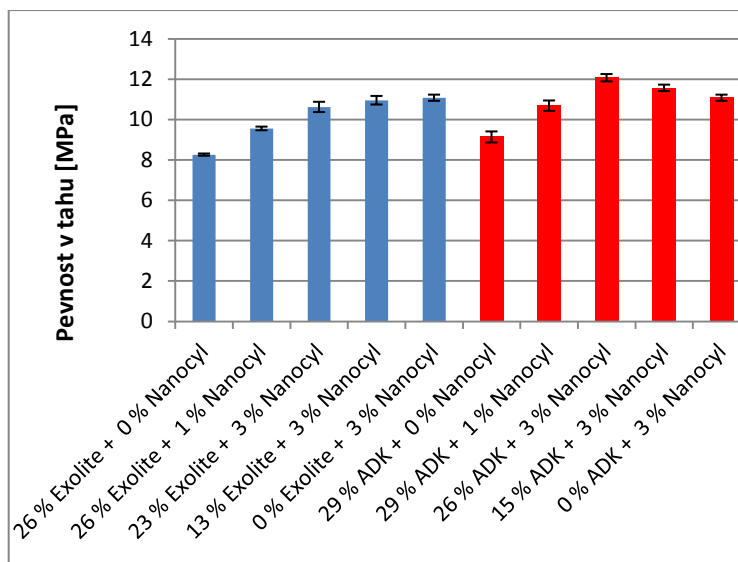


Graf 23.: E modul pro směsi LDPE/Grafmax

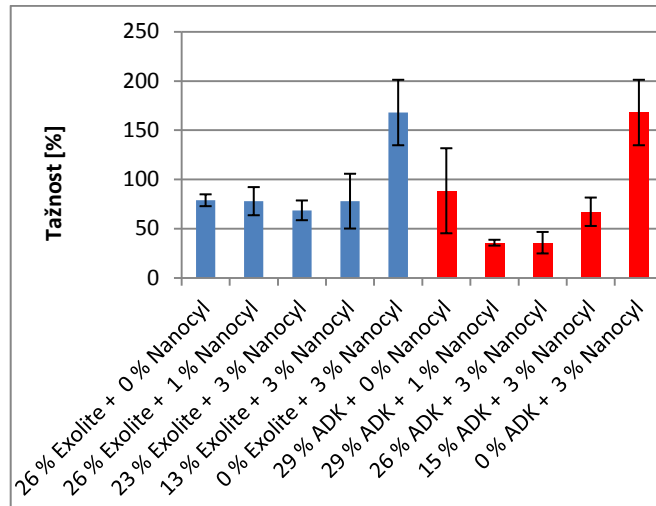
Pevnost v tahu (graf 20.) se výrazně nemění. Lze pozorovat velmi pozvolný růst u obou typů směsí. E modul (graf 23.) naznačuje pro směsi s LDPE/Grafmax/Exolite klesající tendenci. Pro směsi a u směsí LDPE/Grafmax/ADK roste do střední koncentrace a dále klesá.

Tabulka 39: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Nanocyl

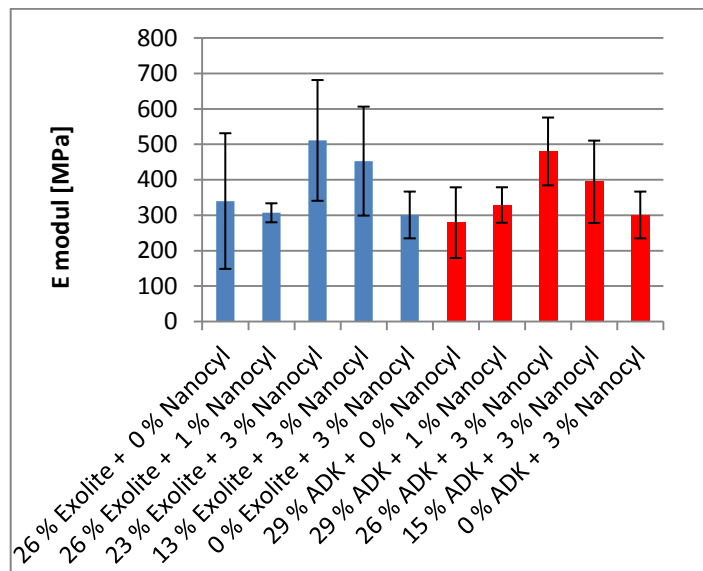
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
26 % Exolite + 0 % Nanocyl	Průměr	8,2610	78,8750	339,9900
	Odchylka	0,0546	6,0177	191,3766
26 % Exolite + 1 % Nanocyl	Průměr	9,5572	77,9510	306,8400
	Odchylka	0,0911	14,2901	26,8168
23 % Exolite + 3 % Nanocyl	Průměr	10,6236	68,6500	511,0460
	Odchylka	0,2549	10,0232	170,4185
13 % Exolite + 3 % Nanocyl	Průměr	10,9544	77,9510	452,7280
	Odchylka	0,2133	27,8091	153,6970
0 % Exolite + 3 % Nanocyl	Průměr	11,0788	167,9280	300,7300
	Odchylka	0,1527	33,2119	65,9608
Vzorek		Pevnost v tahu [MPa]	Tažnost [%]	E [MPa]
29 % ADK + 0 % Nanocyl	Průměr	9,1354	88,5250	279,0360
	Odchylka	0,2744	43,1574	99,7264
29 % ADK + 1 % Nanocyl	Průměr	10,6860	35,8000	328,8680
	Odchylka	0,2568	2,9523	50,0609
26 % ADK + 3 % Nanocyl	Průměr	12,0694	35,8000	479,9660
	Odchylka	0,1820	10,9060	95,6519
15 % ADK + 3 % Nanocyl	Průměr	11,5684	67,2000	394,3160
	Odchylka	0,1592	14,4150	116,1950
0 % ADK + 3 % Nanocyl	Průměr	11,0788	167,9280	300,7300
	Odchylka	0,1527	33,2119	65,9608



Graf 24.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Nanocyl



Graf 25.: Tažnost pro směsi LDPE/Nanocyl



Graf 26.: E modul pro směsi LDPE/Nanocyl

Pevnost v tahu (graf 24.) má rostoucí tendenci pro směsi LDPE/Nanocyl/Exolite a u směsi LDPE/Nanocyl/ADK roste do střední koncentrace a dále klesá. Tažnost, v grafu 25., klesá do středních koncentrací a dále roste. E modul dosahuje maxima při střední koncentraci retardéru.

8.4 Shrnutí

Pevnost v tahu rostla s klesající koncentrací retardérů a nejvyšší hodnoty dosahovala u směsí plněných pouze plnivem. Ze všech plniv nejvyšší pevnost v tahu vykazovala směs LDPE/3 % Dragonite (koncentrát). Naopak nejnižší pevnost vykazovaly směsi LDPE/Grafmax.

Protažení roste obdobně jako pevnost v tahu. Při klesající koncentraci retardérů tažnost roste a směsi bez retardérů vykazují výrazný nárůst protažení.

9 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI

Reologie je věda o tokovém chování materiálů. Základním pojmem reologie je viskozita η . Je to odpor kapaliny, v případě polymerů taveniny, vůči smykovému toku. Viskozita u polymerních tavenin se měří pomocí průtoku kapilárou (kapilární viskozimetry) nebo na rotačních reometrech na základě přenosu kroutícího momentu.

Z měření na reometrech je možné stanovit tokovou křivku, je to závislosti viskozity na rychlosti smykové deformace. Podle tokové křivky rozlišujeme 3 typy kapalin. Newtonské (např. voda), pseudoplastické (polymerní taveniny) a dilatantní (suspenze kukuřičného škrobu ve vodě). U Newtonských kapalin je křivka viskozity v grafu rovnoběžná s osou x , v závislosti na rychlosti smykové deformace se tedy viskozita nemění. U pseudoplastických kapalin viskozita v závislosti na rychlosti smykové deformace klesá. A u dilatantních kapalin viskozita s rychlostí smykové deformace roste. Současně je viskozita i závislá na teplotě, kdy s rostoucí teplotou klesá.

Rotační viskozimetry pracují na principu měření tření mezi rotující a statickou plochou. Rozlišujeme typy viskozimetrů podle tvaru ploch: válec – válec, deska – deska, nebo kužel – deska. Viskozimetry obecně měří polymery v tavenině, výjimkou je typ válec – válec, který se používá pro měření při běžné teplotě, např. pro měření past PVC. Výhodou u typu kužel – deska je možnost měření ve dvou režimech: v rotačním a oscilačním.

Měření reologických vlastností je důležité především pro zpracovatelskou oblast polymerů, kdy udává chování polymerní taveniny při toku štěrbinou. Jedná se především o tvářecí procesy jako je vstřikování a vytlačování. [41]

Reologické vlastnosti byly získány na Montanuniversität Leoben v Rakousku jak pro LDPE tak pro PLA.

9.1 Příprava zkušebních tělísek

Zkušební tělíska na měření byly kolečka o průměru 4 cm. Vzorky pro měření byly vyseknu ty z připravených lisovaných destiček.

9.2 Podmínky měření

Měření bylo provedeno na oscilačním reometru značky Physica MCR 501 s uspořádaným kužel-deska. Vlastní měření probíhalo v inertoní atmosféře dusíku.



Obrázek 22.: Physica MCR 501 (foto vlastní zdroj)

1. Podmínky oscilačního měření směsi LDPE:

- $t = 150\text{ °C}$
- počet měřících bodů: 25
- frekvence: 0,1 – 500 [rad/s]

2. Podmínky oscilačního měření pro směsi PLA:

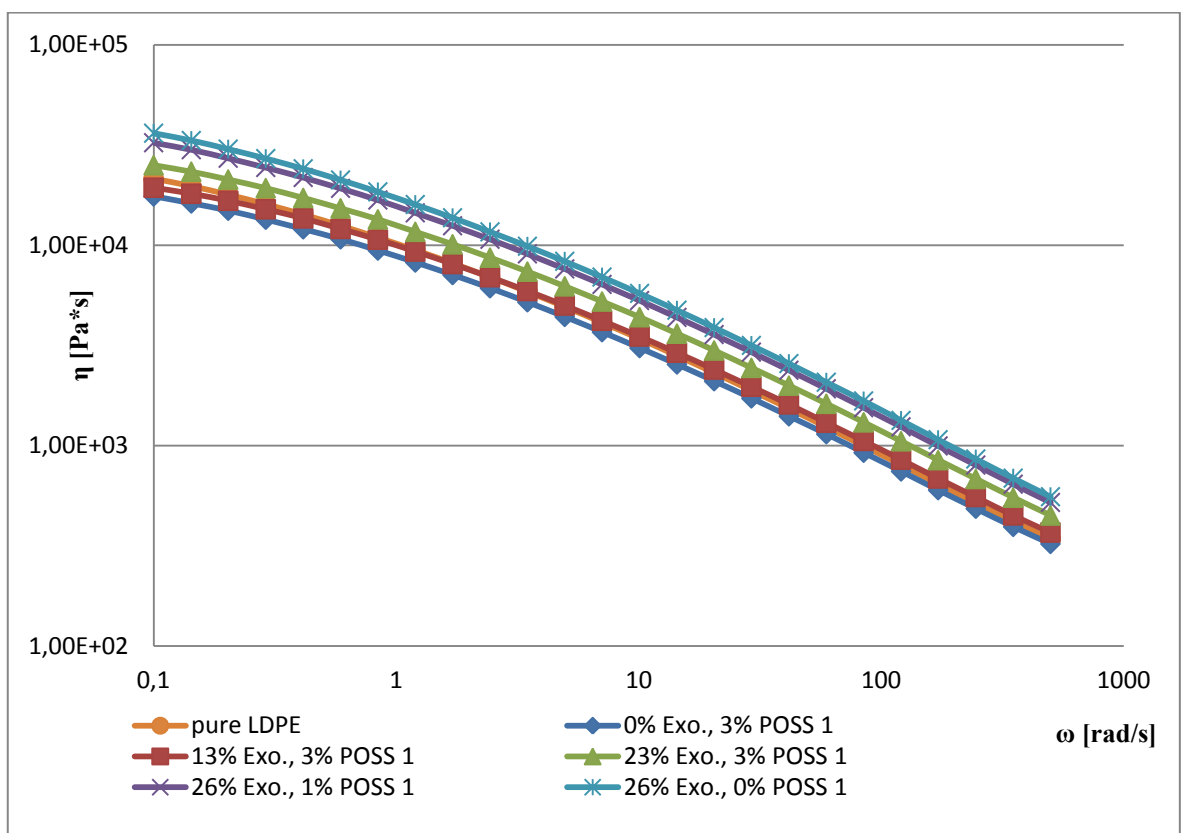
- $t = 180\text{ °C}$
- počet měřících bodů: 19
- frekvence: 0,1 – 500 [rad/s]

9.3 Naměřená data a vyhodnocení

9.3.1 Směsi LDPE

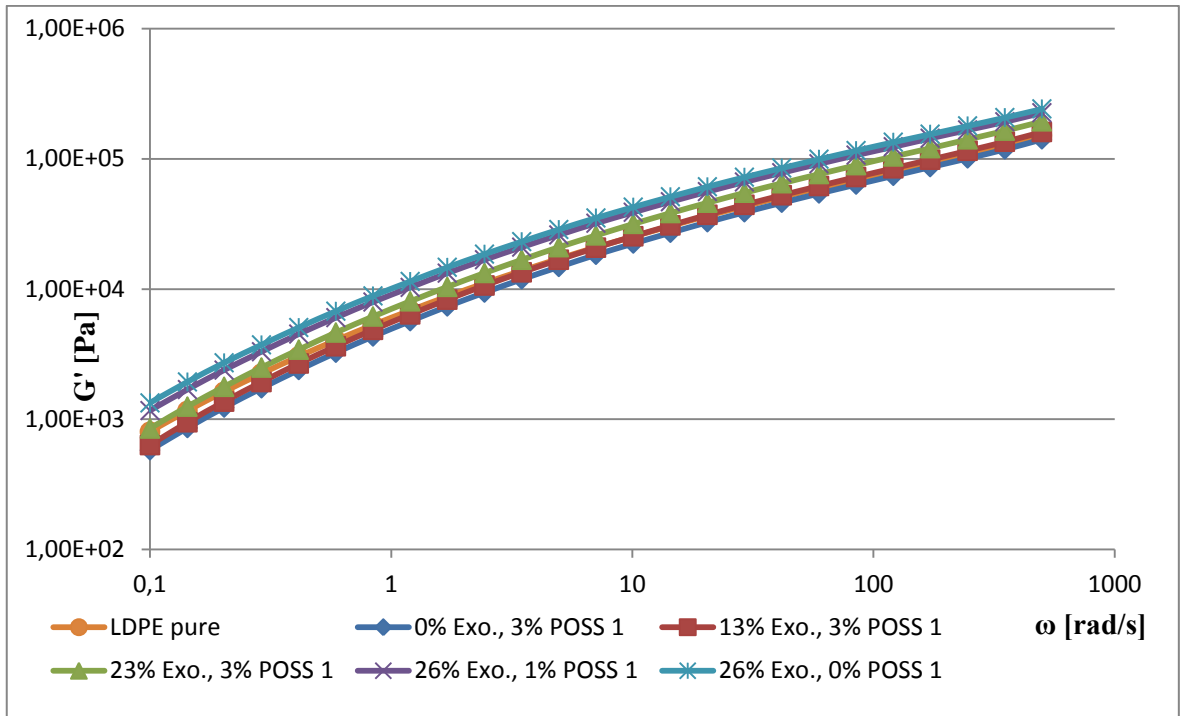
Záznamy reologických měření jsou zachyceny v grafech 27., 28. a 29. a v příloze I. - VIII.

V hodnocení reologických vlastností nejlépe vyšly vlastnosti směsi LDPE/POSS1/Exolite a proto jsou zde publikovány právě tyto výsledky.

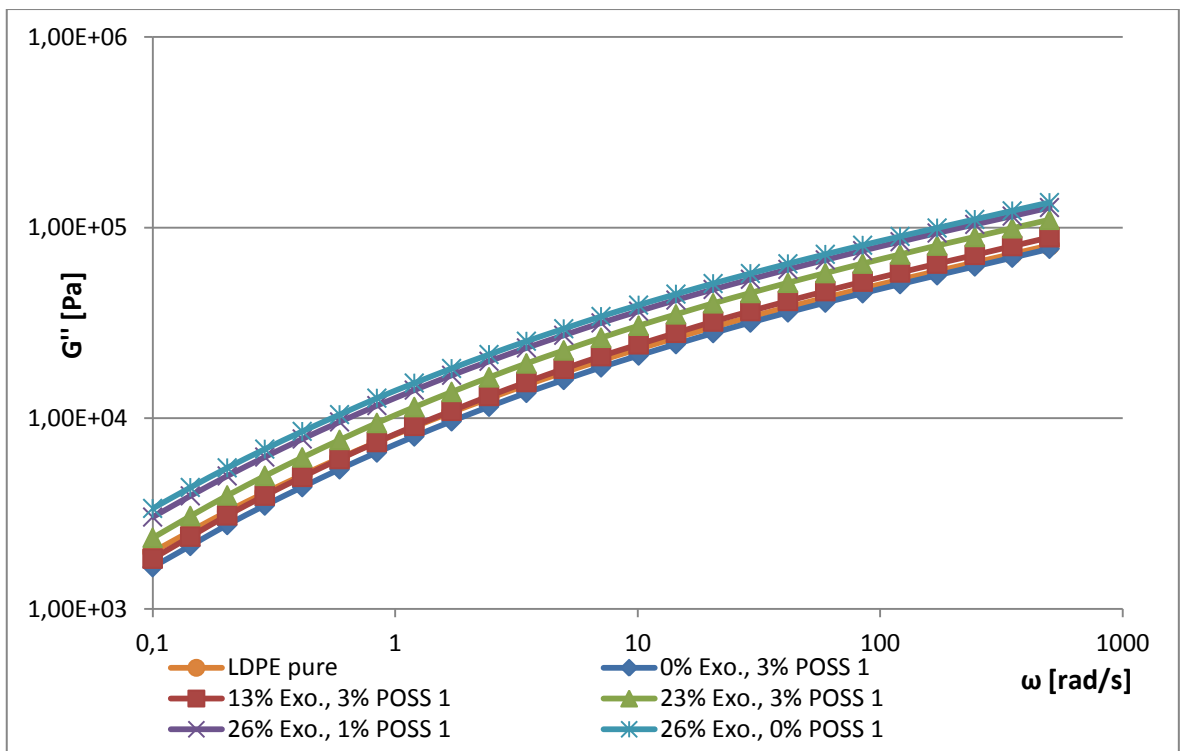


Graf 27.: Závislost komplexní viskozity na frekvenci pro směsi LDPE/ POSS1/Exolit

U směsi LDPE/POSS1/Exolite (graf 27.) pozorujeme pokles viskozity s klesající koncentrací Exolitu. Nižší viskozitu η než čisté LDPE měla směs LDPE/3 % POSS1/0 % Exolite a viskozita směsi LDPE/3 % POSS1/13 % Exolite byla velmi podobná viskozitě čistého LDPE (graf 27.). Stejný trend byl pozorován u elastického G' (graf 28.) a viskozitního modulu G'' (graf 29.).



Graf 28.: Závislost elastického modulu na frekvenci pro čisté LDPE a směsi LDPE/POSS1/Exolit



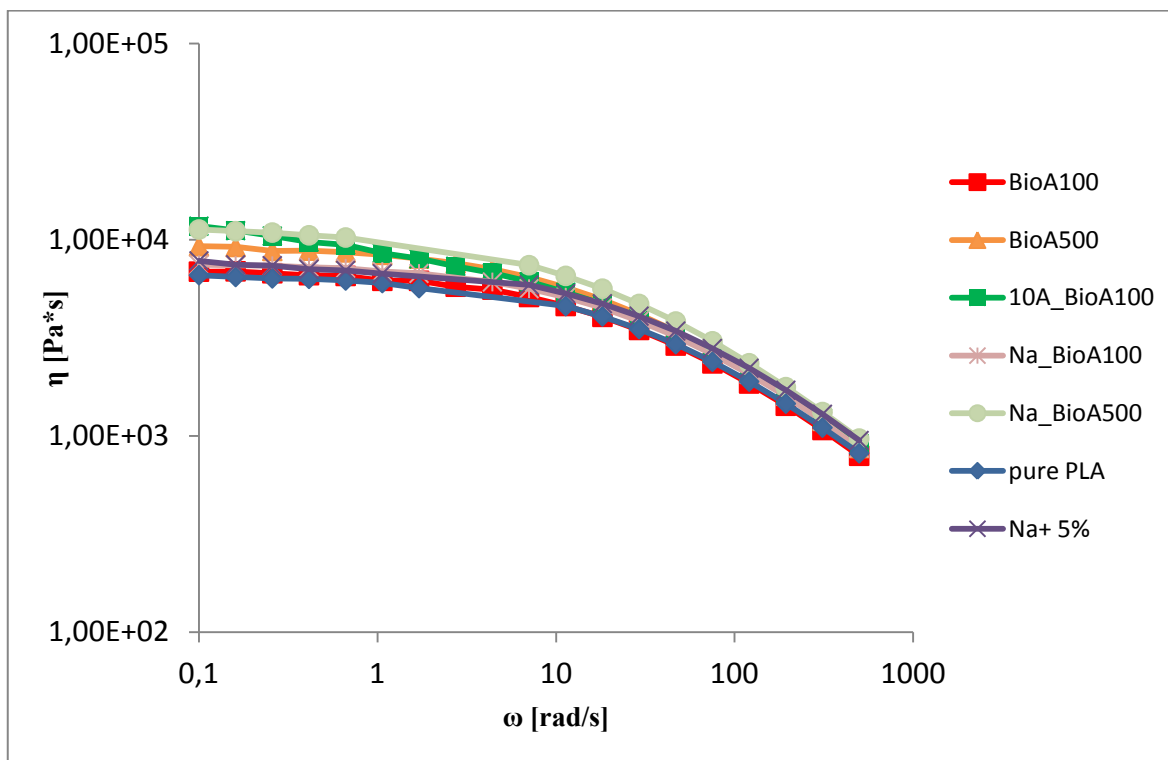
Graf 29.: Závislost viskózního modulu na frekvenci pro čisté LDPE a směsi LDPE/POSS1/Exolit

Velmi podobných výsledků jako směs LDPE/POSS1/Exolite dosáhli směsi LDPE/POSS1/ADK. Také u směsi LDPE/POSS2 bylo dosaženo podobných výsledků pro oba retardéry. U ostatních směsí se reologické vlastnosti zhoršovaly. Rostla viskozita, elastický a viskózní modul. Nejvyšší nárůst viskozity a obou modulů, tedy nevyšší zhoršení reologických vlastností, vykazovaly směsi LDPE/Nanocyl (Příloha VIII.).

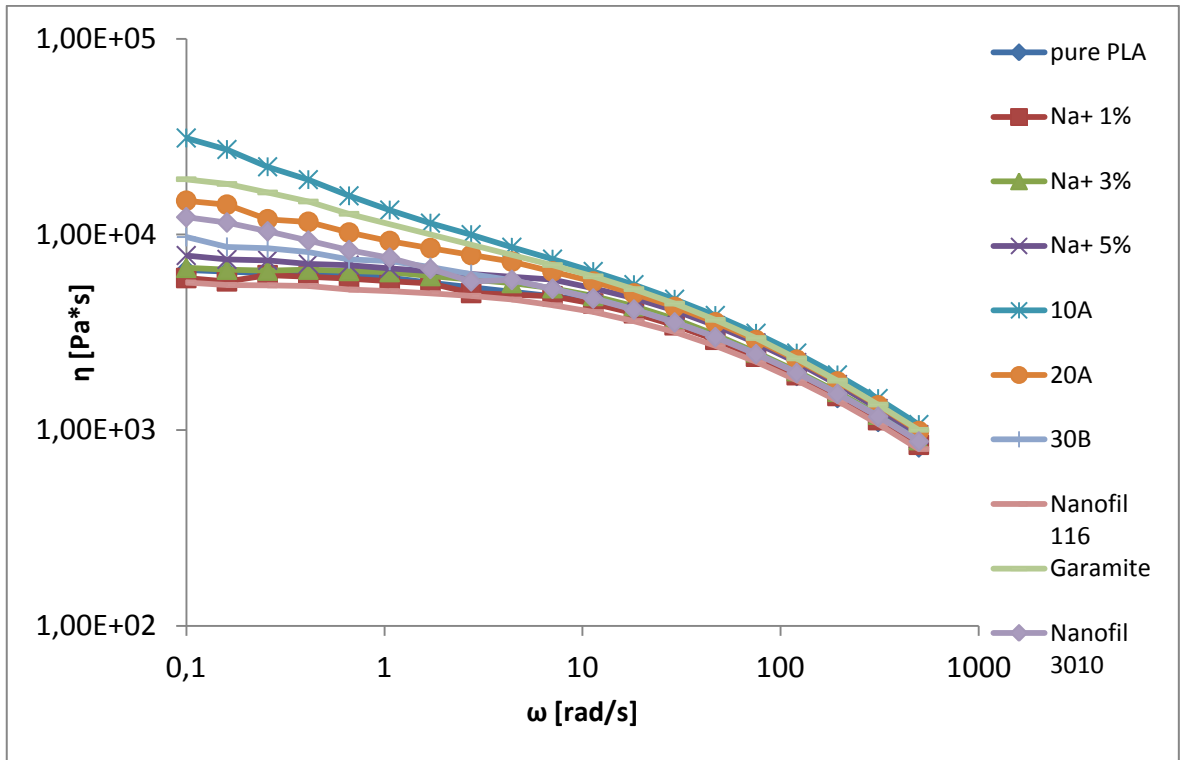
9.3.2 Směsi PLA

Dle grafu 30. nejvyšší viskozity dosahuje směs PLA/Na/Bio500. Naopak nejnižší viskozitu má směs PLA/Bio100, která je téměř stejná s viskozitou čistého PLA.

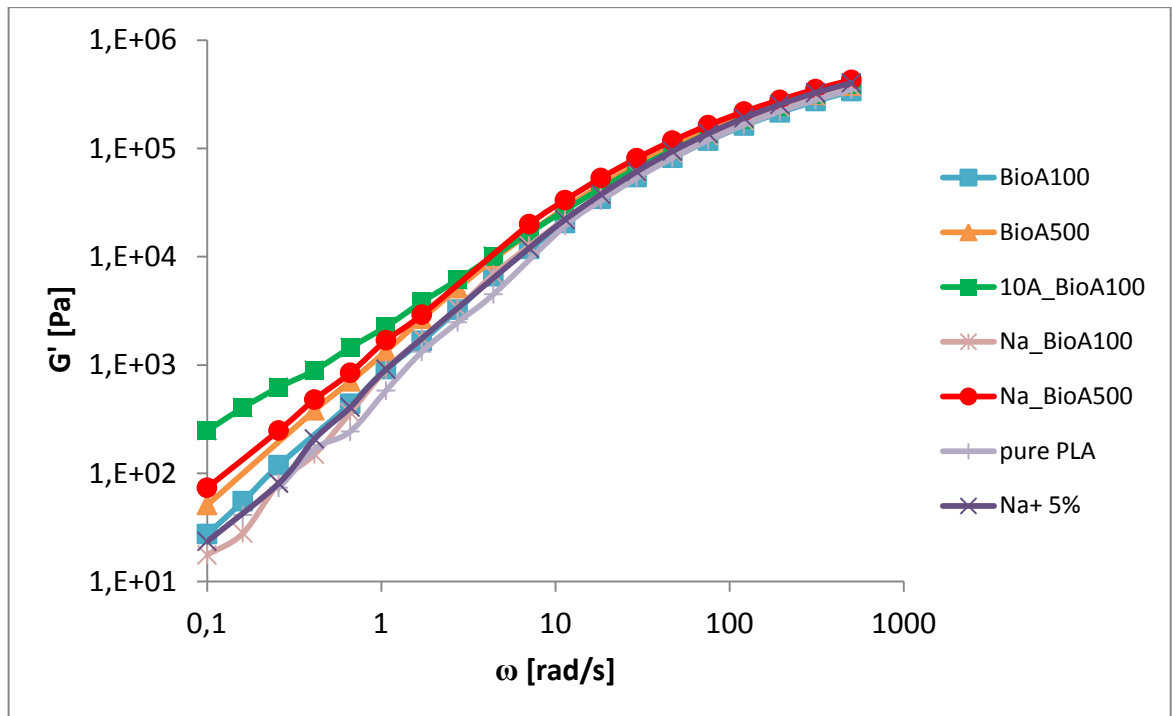
V grafu 31. nejvyšší viskozity dosahuje směs PLA/10A. Tato směs dosahuje celkově nejvyšší viskozity ze všech směsí PLA. Na druhém místě za Cloisitem 10A je směs PLA s garamitem. Snížení viskozity vůči čistému PLA dosáhli směsi PLA/Nanofil 116 a PLA/Na+ 1%.



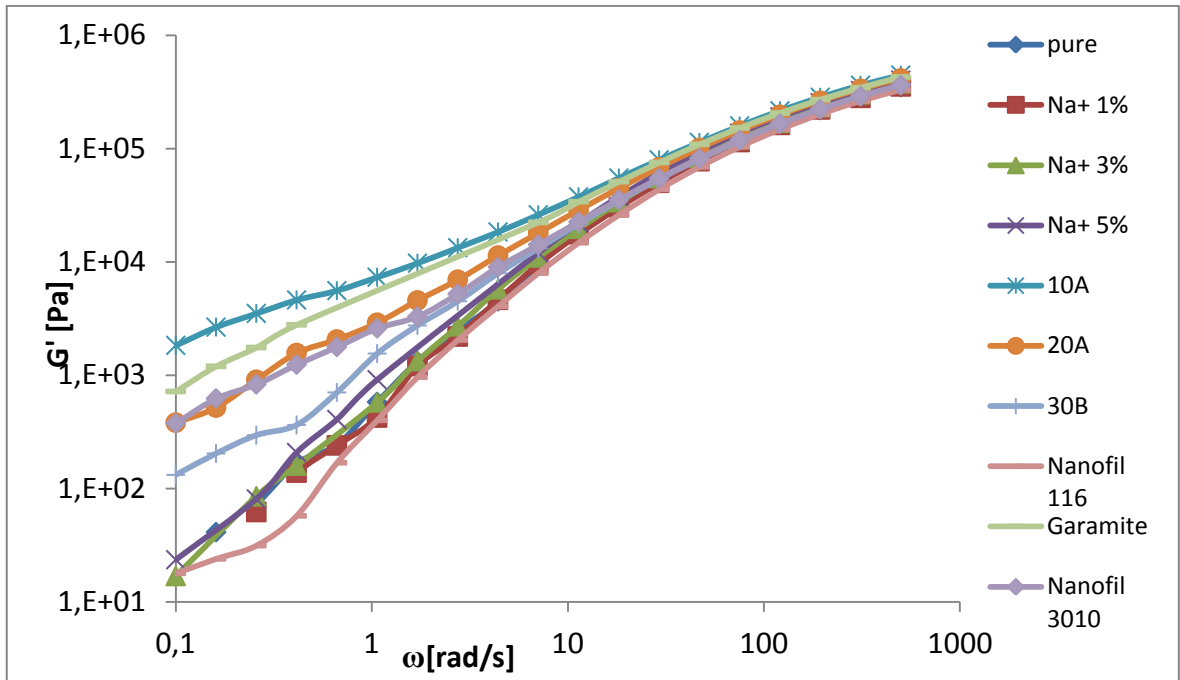
Graf 30.: Závislost komplexní viskozity na frekvenci pro nanokompozity PLA



Graf 31.: Závislost komplexní viskozity na frekvenci pro nanokompozity PLA

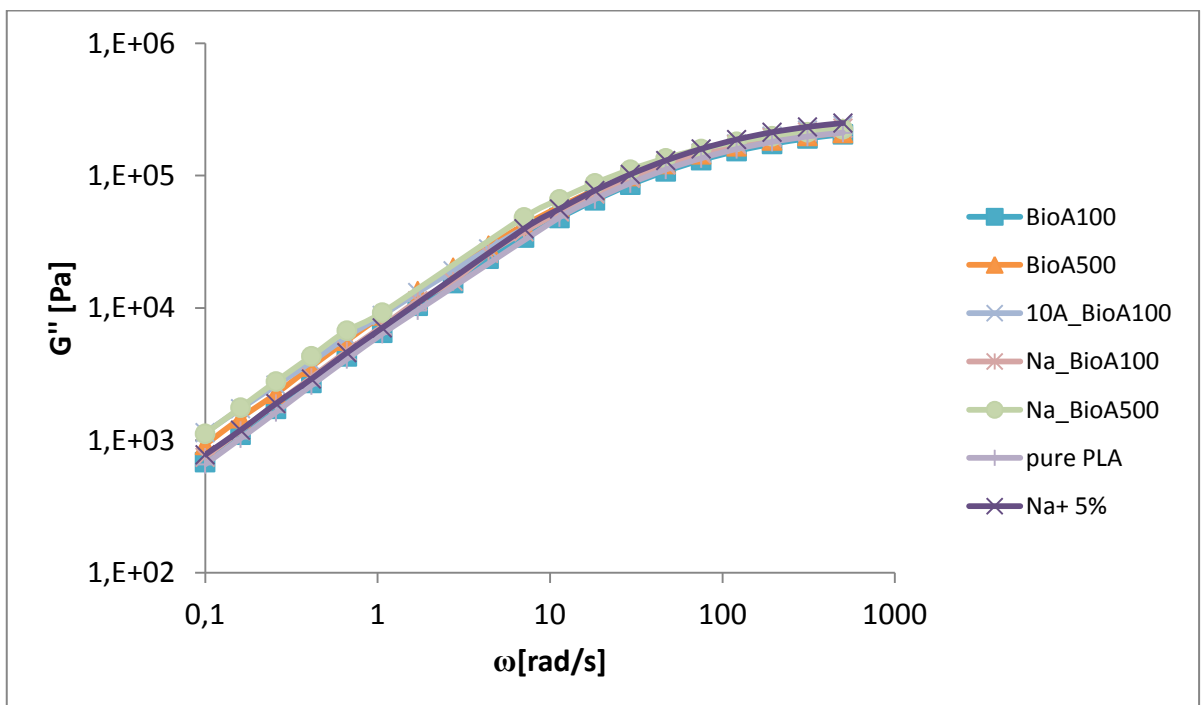


Graf 32.: Závislost elastického modulu na frekvenci pro nanokompozity PLA

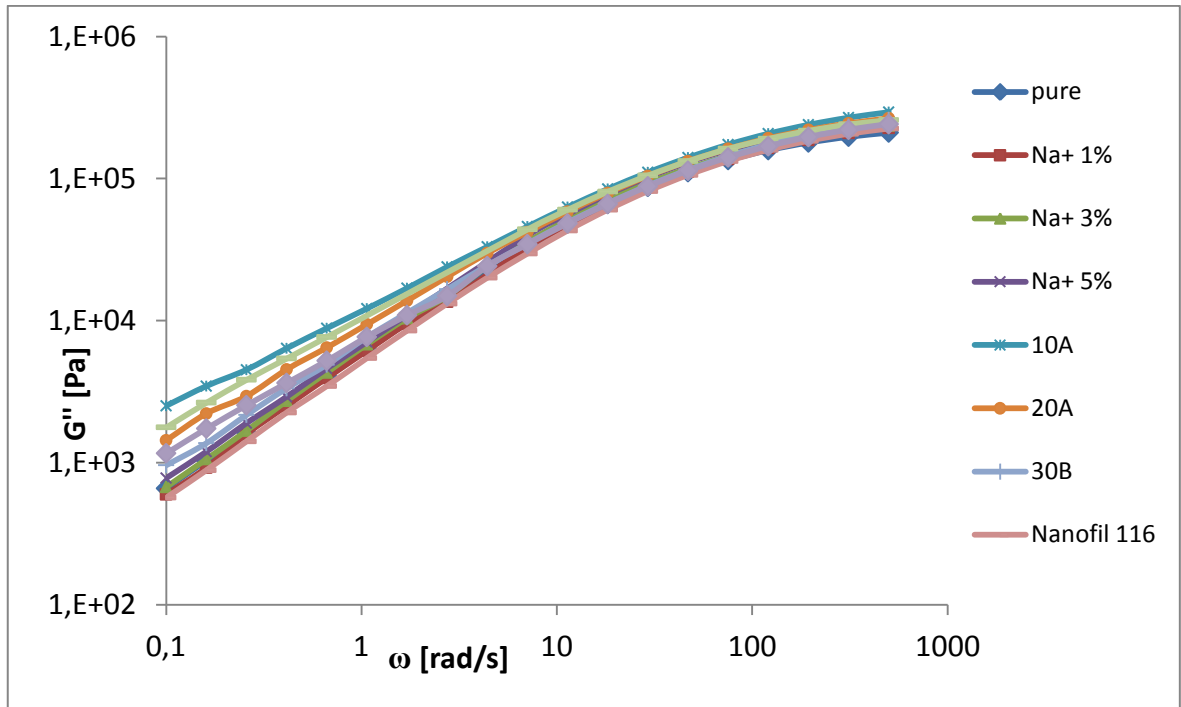


Graf 33.: Závislost elastického modulu na frekvenci pro nanokompozity PLA

Vývoj elastického modulu je obdobný jako u viskozity. Vývoj G' v grafu 32. lze srovnat nárůstem viskozity v grafu 30. A obdobný průběh je u G' (graf 33.) podle grafu 31.

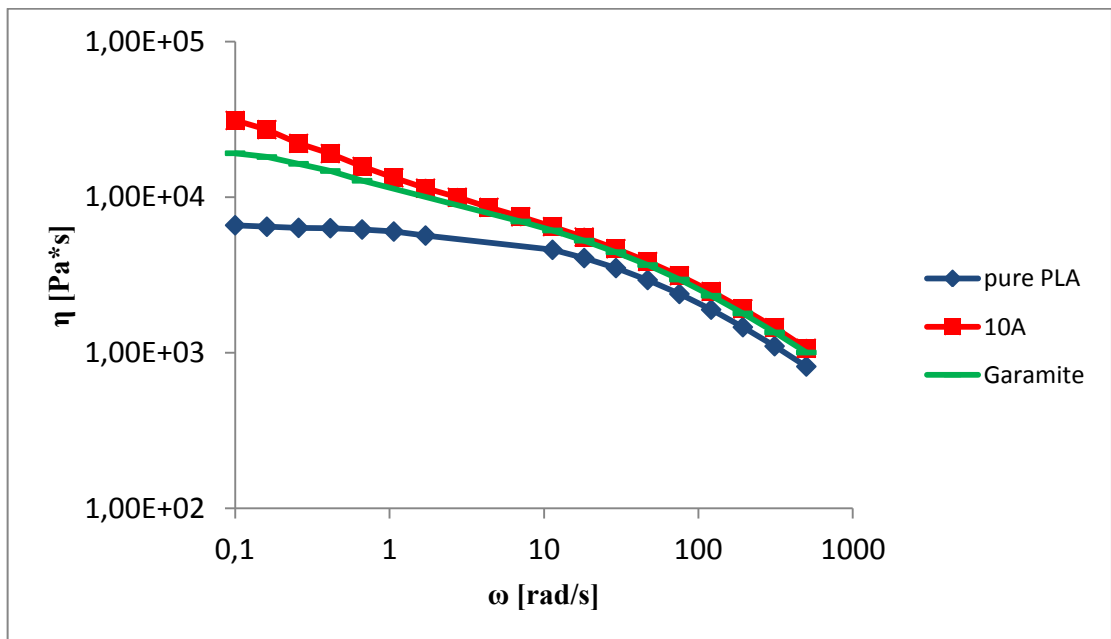


Graf 34.: Závislost viskozitního modulu na frekvenci pro nanokompozity PLA



Graf 35.: Závislost viskozitního modulu na frekvenci pro nanokompozity PLA

Také viskozitní moduly mají podobný průběh dle jednotlivých plniv analogicky podle odpovídající viskozity. V grafu 31. má nejvyšší viskozitu směs PLA/10A, tomu odpovídá v grafu 35. nejvyšší viskozitní modul směsi PLA/10A.



Graf 36.: Srovnání komplexní viskozity čistého PLA, PLA/10A a PLA/Garamite

V grafu 36. je srovnání viskozity čistého PLA a směsí PLA/10A a PLA/Garamite, které vykazovaly nejvyšší naměřenou viskozitou mezi nanokompozity. Významné zvýšení je patrné zejména při nižších frekvencích. S rostoucí frekvencí rozdíl klesá. Zvýšená viskozita může souviset s interkalací či exfoliací plniva v polymerní matici a s jeho dobrou dispergací v polymeru.

9.4 Shrnutí

Směsi LDPE/POSS 1 vykazovaly při plnění pouze 3 % POSS 1 snížení viskozity a obou modulů. Snížení viskozity je výhodné při zpracování materiálu a díky nižší viskozitě jsou stroje méně opotřebovány.

Současně při srovnání směsí pouze se standardními retardéry hoření viskozita klesá, což může být výhodné při zpracování. Jedinou výjimkou byly směsi LDPE/Nanocyl, kdy došlo k výraznému zvýšení viskozity i modulů. Viskozita i moduly byli vyšší než u směsí pouze s retardéry hoření.

U směsí PLA vykazovala nejvyšší viskozitu směs PLA/10A, kdy výrazné zvýšení bylo zejména při nižších frekvencích.

10 RENTGENOGRAFIE: STANOVENÍ KRYSTALINITY

Rentgenografie je založena na schopnostech ionizujícího záření procházet látkami, přičemž dochází k jeho absorpci a rozptylu. Záření vzniká na katodách (nejčastěji Cu, Co, Mo a Fe). Katodou prochází proud a ze žhaveného wolframového vlákna se emitují elektrony. Ty jsou urychlovány a po jejich dopadu na anodu vzniká rentgenové záření.

Výstupem jsou záznamy kvant RTG záření. Záznamy jsou nejčastěji formou digitálního záznamu, kde se difrakční maxima projevují jako píky s různou výškou a tvarem. [42]

10.1 Příprava zkušebních tělísek

Pro rentgenografická měření byly použity tělíska o rozměru 2 x 2 x 0,2 cm získaná z lisovaných destiček.

10.2 Podmínky měření

Struktura byla studována na zařízení X'Pert PRO od firmy PANalytical.

- Anoda: měděná
- Vlnová délka: 154 nm
- Teplota: pokojová teplota
- Krok měření: měřeno 1115 bodů pro rozsah $1^\circ - 30^\circ 2\theta$
- Výdrž: 49,452 s

Stanovení krystalinity se provádělo pomocí programu X'Pert HighScore od společnosti PANalytical z naměřených dat.

10.3 Naměřená data a vyhodnocení

Krystalinita je většinou definovaná jako podíl plochy píku krystalických oblastí, k celkové ploše vymezeného záznamu. U čistých látek je krystalinita počítána podle:

$$X = (A/C) * 100$$

$$C = A + B$$

Kde: A je suma čisté intenzity,
 B je součet intenzity amorfního halo (pozadí),
 C je suma pozorované intenzity.

V případě směsí či kompozitů je těžší určit krystalinitu určité látky, zvlášť pokud se vyhodnocuje jen z vymezené oblasti úhlu 2Θ , protože se zde objevují krom piku měřené látky i píky jiných látek. Potom se krystalinita počítá podle:

$$X = \frac{D}{D + B * z} * 100$$

Kde: D je plocha píků,
 B je suma intenzity amorfního halo (pozadí),,
 z je rozlišení měření.

Hodnota rozlišení je různá dle nastavení měřícího programu a je možné ji přepočítat, ale většinou se udává hodnota $0,026 \text{ } ^\circ 2\Theta$ a tuto hodnotu jsem si také zvolila pro vlastní výpočet.

Tabulka 40.: Vypočítaná krystalinita pro čisté LDPE a pro směsi s retardéry

Směs	A	B	C	X [%]
pure LDPE	591793,5	844439,9	1436233,0	41,2
Směs	D	B	z	X [%]
26% Exo + 0% Nanoplňiva	3711,5	330430,6	0,026	30,1683
29% ADK + 0% Nanoplňiva	4530,9	378165,8	0,026	31,5451

V tabulce 40. jsou zachyceny hodnoty krystalinity pro čisté LDPE, 41,2 % a směsi se standardními retardéry hoření Exolite a ADK, kde bylo dosaženo krystalinity 30,2 a 31,5 %.

Tabulka 41.: Vypočítaná krystalinita pro směsi LDPE

Směs	D	B	z	X [%]
0% Exolite + 3% POSS 1	10101,5	840982,6	0,026	31,60
13% Exolite + 3% POSS 1	5370,6	424173,1	0,026	32,75
23% Exolite + 3% POSS 1	3729,8	347293,0	0,026	29,23
26% Exolite + 1% POSS 1	3725,8	355852,1	0,026	28,71
26% Exolite + 0% POSS 1	3711,5	330430,6	0,026	30,17
0% ADK + 3% POSS 1	10101,5	840982,6	0,026	31,60
15% ADK + 3% POSS 1	5797,6	443387,8	0,026	33,46
26% ADK + 3% POSS 1	4568,5	365074,9	0,026	32,49
26% ADK + 3% POSS 1	4596,4	366279,0	0,026	32,55
29% ADK + 0% POSS 1	4530,9	378165,8	0,026	31,55
0% Exolite + 3% POSS 2	11038,4	837753,2	0,026	33,63
13% Exolite + 3% POSS 2	5457,5	418257,1	0,026	33,42
23% Exolite + 3% POSS 2	3758,0	382509,1	0,026	27,42
26% Exolite + 1% POSS 2	3434,2	347359,1	0,026	27,55
26% Exolite + 0% POSS 2	3711,5	330430,6	0,026	30,17
0% ADK + 3% POSS 2	11038,4	837753,2	0,026	33,63
15% ADK + 3% POSS 2	5162,9	412145,9	0,026	32,51
26% ADK + 3% POSS 2	5589,1	348019,3	0,026	38,18
29% ADK + 1% POSS 2	4153,5	347241,5	0,026	31,51
29% ADK + 0% POSS 2	4530,9	378165,8	0,026	31,55
0% Exolite + 3% Dragoite (prášek)	10183,8	747554,8	0,026	34,38
13% Exolite + 3% Dragoite (prášek)	5509,6	449769,7	0,026	32,03
23% Exolite + 3% Dragoite (prášek)	3602,3	315582,4	0,026	30,51
26% Exolite + 1% Dragoite (prášek)	3658,0	344287,6	0,026	29,01
26% Exolite + 0% Dragonite (prášek)	3711,5	330430,6	0,026	30,17
0% ADK + 3% Dragoite (prášek)	10183,8	747554,8	0,026	34,38
15% ADK + 3% Dragoite (prášek)	5628,4	410925,4	0,026	34,50
26% ADK + 3% Dragoite (prášek)	3953,7	348685,4	0,026	30,37
29% ADK + 1% Dragoite (prášek)	3709,4	244431,8	0,026	36,86
29% ADK + 0% Dragonite (prášek)	4530,9	378165,8	0,026	31,55
0% Exolite + 3% Dragoite (koncentrát)	9418,9	737771,9	0,026	32,93
13% Exolite + 3% Dragoite (koncentrát)	5293,8	428415,0	0,026	32,22
23% Exolite + 3% Dragoite (koncentrát)	3399,9	304055,2	0,026	30,07
26% Exolite + 1% Dragoite (koncentrát)	3141,5	324011,9	0,026	27,16
26% Exolite + 0% Dragonite (koncentrát)	3711,5	330430,6	0,026	30,17
0% ADK + 3% Dragoite (koncentrát)	9418,9	737771,9	0,026	32,93
15% ADK + 3% Dragoite (koncentrát)	5956,0	445560,0	0,026	33,96
26% ADK + 3% Dragoite (koncentrát)	3887,0	349564,8	0,026	29,96
29% ADK + 1% Dragoite (koncentrát)	3780,0	360097,2	0,026	28,76
29% ADK + 0% Dragonite (koncentrát)	4530,9	378165,8	0,026	31,55

Směs	D	B	z	X [%]
0% Exolite + 3% Perkalite	8681,3	707705,7	0,026	32,06
13% Exolite + 3% Perkalite	5625,0	458429,2	0,026	32,06
23% Exolite + 3% Perkalite	3851,0	351094,0	0,026	29,67
26% Exolite + 1% Perkalite	3413,3	326754,5	0,026	28,66
26% Exolite + 0% Perkalite	3711,5	330430,6	0,026	30,17
0% ADK + 3% Perkalite	8681,3	707705,7	0,026	32,06
15% ADK + 3% Perkalite	5678,9	500616,7	0,026	30,38
26% ADK + 3% Perkalite	4329,4	414866,2	0,026	28,64
29% ADK + 1% Perkalite	3484,8	372874,8	0,026	26,44
29% ADK + 0% Perkalite	4530,9	378165,8	0,026	31,55
0% Exolite + 3% Pangel	10722,7	599292,6	0,026	40,76
13% Exolite + 3% Pangel	5625,0	458429,2	0,026	32,06
23% Exolite + 3% Pangel	3801,7	333848,9	0,026	30,46
26% Exolite + 1% Pangel	3457,7	350020,1	0,026	27,53
26% Exolite + 0% Pangel	3711,5	330430,6	0,026	30,17
0% ADK + 3% Pangel	10722,7	599292,6	0,026	40,76
15% ADK + 3% Pangel	5746,2	421921,1	0,026	34,38
26% ADK + 3% Pangel	3274,2	302470,6	0,026	29,40
29% ADK + 1% Pangel	4364,0	373612,5	0,026	30,99
29% ADK + 0% Pangel	4530,9	378165,8	0,026	31,55
0% Exolite + 3% Grafmax	11963,6	947358,0	0,026	32,69
13% Exolite + 3% Grafmax	6390,4	534379,9	0,026	31,50
23% Exolite + 3% Grafmax	3191,6	294329,7	0,026	29,43
26% Exolite + 1% Grafmax	3388,2	325062,3	0,026	28,62
26% Exolite + 0% Grafmax	3711,5	330430,6	0,026	30,17
0% ADK + 3% Grafmax	11963,6	947358,0	0,026	32,69
15% ADK + 3% Grafmax	6393,2	481351,2	0,026	33,81
26% ADK + 3% Grafmax	4709,6	396404,8	0,026	31,36
29% ADK + 1% Grafmax	3184,2	298858,8	0,026	29,07
29% ADK + 0% Grafmax	4530,9	378165,8	0,026	31,55
0% Exolite 3% Nanocyl	10613,4	856494,1	0,026	32,28
13% Exolite + 3% Nanocyl	6357,0	506028,3	0,026	32,58
23% Exolite + 3% Nanocyl	4375,8	367088,0	0,026	31,44
26% Exolite + 1% Nanocyl	3125,6	293594,1	0,026	29,05
26% Exolite + 0% Nanocyl	3711,5	330430,6	0,026	30,17
0% ADK + 3% Nanocyl	10613,4	856494,1	0,026	32,28
15% ADK + 3% Nanocyl	5924,2	486583,0	0,026	31,90
26% ADK + 3% Nanocyl	4232,0	474805,7	0,026	25,52
29% ADK + 1% Nanocyl	4373,2	330706,8	0,026	33,71
29% ADK + 0% Nanocyl	4530,9	378165,8	0,026	31,55

1. POSS 1: S klesající koncentrací retardéru Exolite roste mírně i krystalinita. Pokud srovnáme s čistým LDPE, tak hodnota krystalinity je pro směs LDPE/3 % POSS 1/0 % Exolite nižší o 10 %. Pro 26 % Exolite/0 % POSS1 a 0 % Exolite/ 3 % POSS1 se liší o 1 %. U směsi s ADK krystalinita roste velmi nepatrně a u vzorku s 0 % ADK + 3 % POSS1 roste na stejnou hodnotu jako u směsi 29 % ADK + 0 % POSS1.
2. POSS 2: S klesající koncentrací retardérů (Exolite i ADK) roste mírně i krystalinita. Pokud srovnáme s čistým LDPE, tak její hodnota je pro směs LDPE/3 % POSS 2/0 % Exolite nižší o 8 %. Pro 26 % Exolite/0 % POSS2 a 0 % Exolite/3 % POSS2 se liší o 2 %.
3. Dragonite (prášek): S klesající koncentrací Exolite roste mírně i krystalinita. Pokud srovnáme s čistým LDPE, tak její hodnota je pro směs LDPE/3 % Dragonite (prášek)/0 % Exolite nižší o 7 %. Pro 26 % Exolite/ 0% Dragonite (prášek) a 0 % Exolite/3 % Dragonite (prášek) se liší o 4 %. Podobně jsou na tom z hlediska krystalinity vzorky s ADK. Vyjimkou je směs s LDPE/1 % Dragonite (prášek)/29 % ADK, kde krystalinity vzrostla oproti vzorku LDPE/29 % ADK bez nanoplniva.
4. Dragonite (koncentrát): S klesající koncentrací retardérů (Exolite i ADK) roste mírně i krystalinita. Pokud srovnáme s čistým LDPE, tak její hodnota je pro směs LDPE/3 % Dragonite (koncentrát)/0 % Exolite nižší o 9 %. Pro 26 % Exolite/0 % Dragonite (koncentrát) a 0 % Exolite/3 % Dragonite (koncentrát) se liší 3 %.
5. Perkalite: S klesající koncentrací retardérů (Exolite a ADK) má krystalinita mírně rostoucí trend. Pokud srovnáme s čistým LDPE, tak její hodnota je pro směs LDPE/3 % Perkalite/0 % Exolite nižší o 9 %. Pro směsi 26 % Exolite/0 % Perkalite a 0 % Exolite/3 % Perkalite se liší o 2 %.
6. Pangel.:S klesající koncentrací retardérů (Exolite a ADK) krystalinita roste. Pokud srovnáme s čistým LDPE, tak hodnota krystalinity je pro směs LDPE/3 % Pangel/0 % Exolite nižší pouze o 1 %. Pro směsi 26 % Exolite/0 % Pangel a 0 % Exolite/3 % Pangel se liší o 10%.
7. Grafmax: S klesající koncentrací retardérů (Exolite i ADK) roste mírně i krystalinita. Pokud srovnáme s čistým LDPE, tak její hodnota je pro směs LDPE/3 % Grafmax/0 % Exolite nižší o 9 %. Pro směsi 26 % Exolite/ 0 % Grafmax a 0 % Exolite/3 % Grafmax se liší o 2 %.

8. Nanocyl: S klesající koncentrací retardéru Exolite roste mírně i krystalinita. Pokud srovnáme s čistým LDPE, tak její hodnota je pro směs LDPE/3 % Nanocyl/0 % Exolite nižší o 9 %. Pro směsi 26 % Exolite/0 % Nanocyl a 0% Exolite/3% Nanocyl se liší o 2 %. U retardéru ADK lze pozorovat minimum při plnění 26 % ADK/3 % Nanocyl. Směs 15 % ADK/3 % Nanocyl se blíží hodnotou krystalinity směsi s bez přídavku nanoplňiva (29 % ADK/0 % Nanocyl).

10.4 Shrnutí

Po srovnání všech dat bylo zjištěno, že krystalinita s klesající koncentrací obou retardérů (Exolite a ADK) téměř pro všechny vzorky roste. Výjimka byla zaznamenána u vzorků s retardérem ADK, kdy krystalinita klesla, a to u směsi LDPE/3%POSS1/0%ADK. Největší nárůst krystalinity byl zaznamenán pro směsi obsahující plnivo Pangel, kde kompozity s 0 % retardéru/3 % Pangel dosahovaly téměř stejné hodnoty jako čisté LDPE.

11 SKENOVACÍ ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE

Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) patří do skupiny elektronové mikroskopie. Samotná mikroskopie je užívána pro zkoumání morfologie materiálů. Elektronová mikroskopie pracuje na principu, kdy obraz je vytvářen elektronovými paprsky vycházejícími ze žhaveného wolframového vlákna.

Při SEM na skenovaný vzorek dopadají elektrony a interakcí s hmotou z vzorku vyraží elektrony. Následně jsou vyzářené elektrony přitahovány pomocí vhodného potenciálu na detektor. Detektor vytváří signál, který je dále upravován pro zpracování v zobrazovacím systému. [43,44]

11.1 Příprava zkušebních tělísek

Vzorky byly připraveny lámáním v tekutém dusíku. Následně byly vzorky sušeny 20 minut při 80 °C. Po vytažení se sušárny a vychladnutí byly vzorky napařeny vodivou kovovou vrstvou.

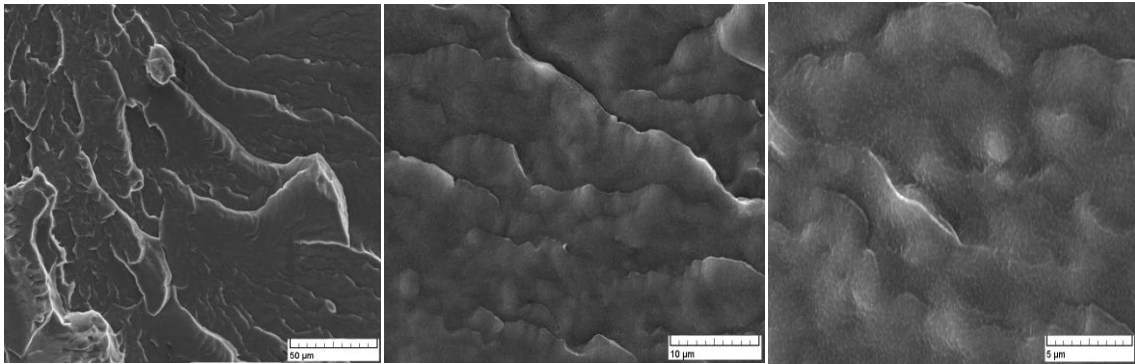
11.2 Podmínky měření

Měření probíhalo na přístroji TESCAN VEGA II. Urychlovací napětí bylo přednastaveno na 10 kV. Snímky byly pořízeny při zvětšení 1000x, 5000x a 10000x.

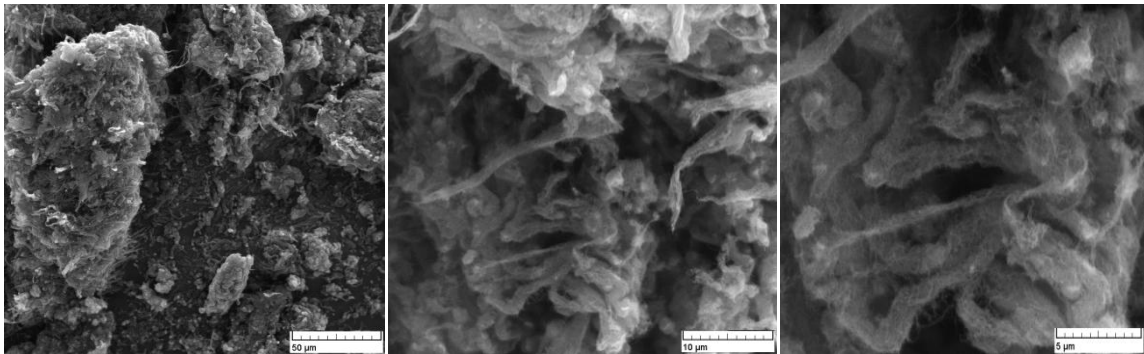
11.3 Naměřená data a vyhodnocení

Z technických důvodů nebylo možné nafotit všechny vzorky, proto jsme vybrali pouze 11 vzorků, jejichž snímky jsou publikovány níže.

Na obrázku 23. je čistá neplněná matrice LDPE. Na dalším obrázku 24. jsou SEM snímky plniva Nanocyl (uhlíkové nanotrubičky).

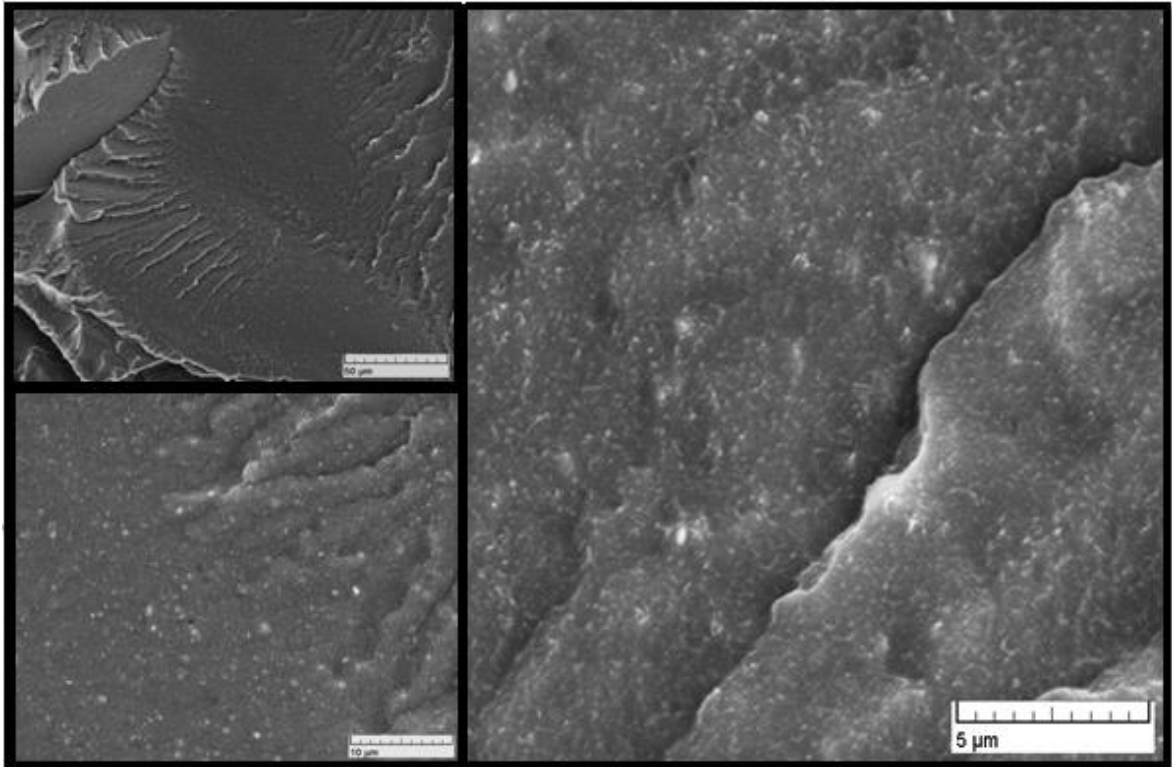


Obrázek 23.: Snímek SEM pro čisté LDPE - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x

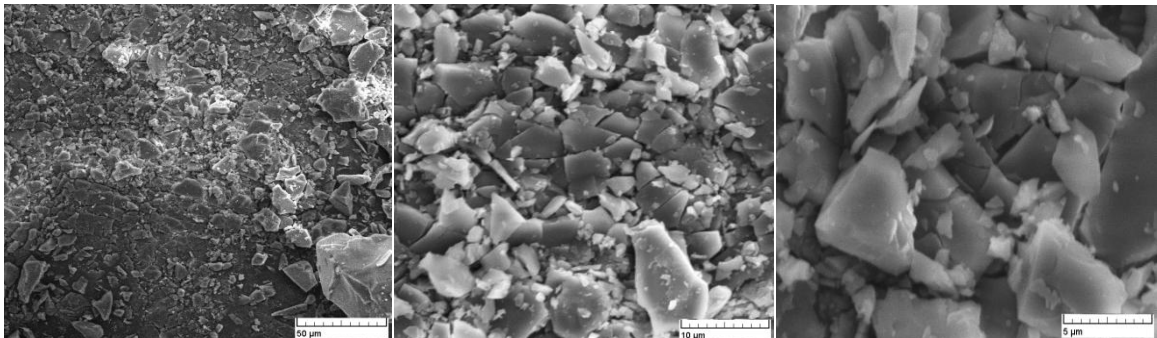


Obrázek 24.: Snímek SEM pro plnivo Nanocyl - vlevo zvětšení 1000x, uprostře zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x

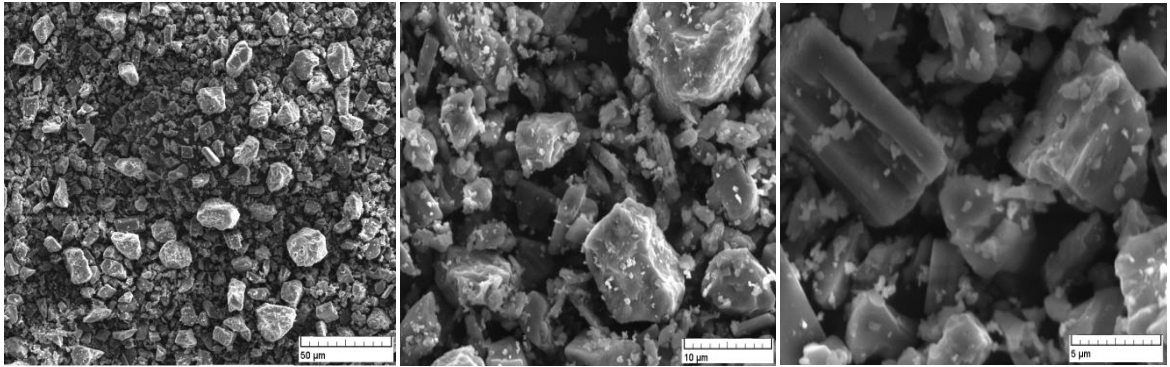
Na obrázku 25. jsou snímky směsi LDPE/0 % ADK/3 % Nanocyl. Ze snímků je patrné, že plnivo drží v matrici LDPE a nejsou kolem něj trhlinky. Dále lze říci, že došlo k dobré distribuci plniva. Na snímku je patrná i struktura nanotrubiček v podobě jemné sítě.



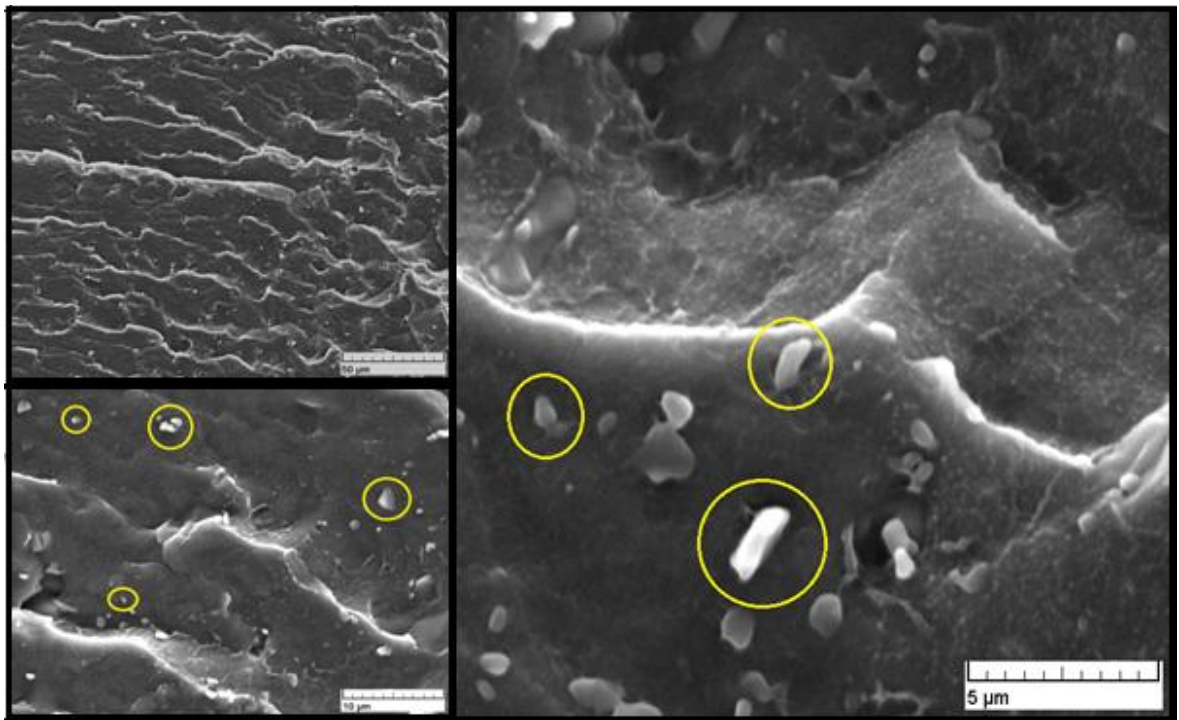
Obrázek 25.: Snímek SEM pro směs LDPE/0 % ADK/3 % Nanocyl - nahoře vlevo zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x, vpravo 10000x



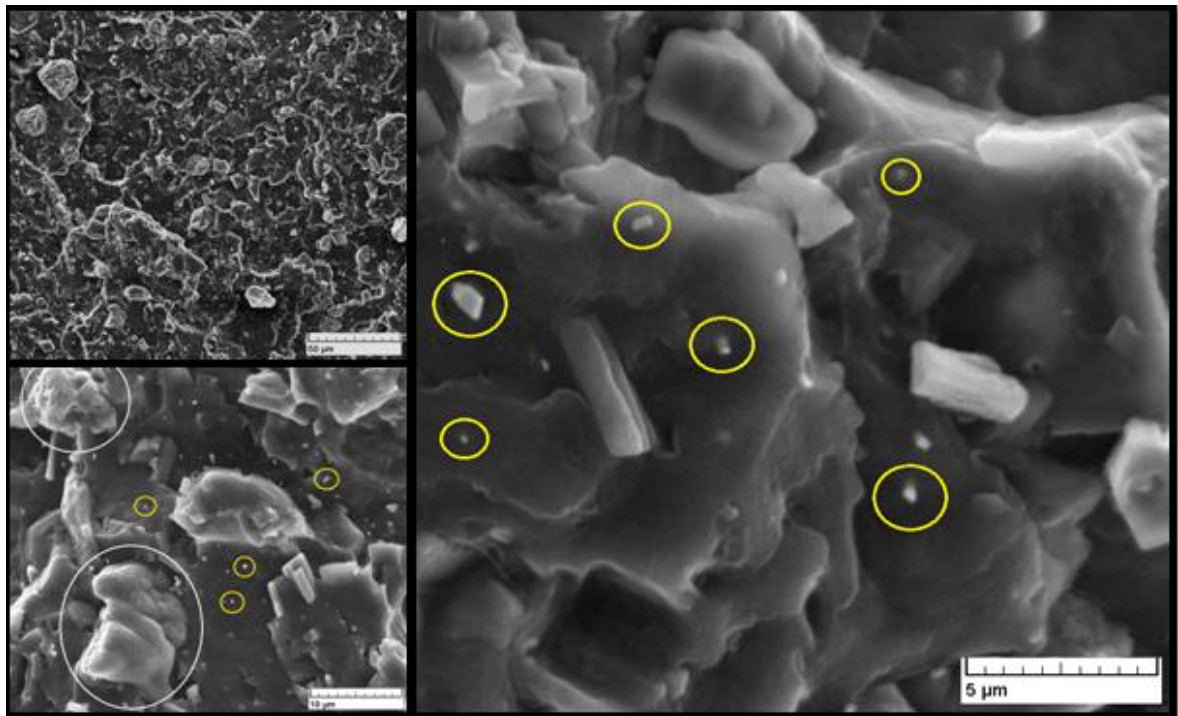
Obrázek 26.: Snímek SEM pro plnivo POSS1 - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x



Obrázek 27.: Snímek SEM pro retardér ADK - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x

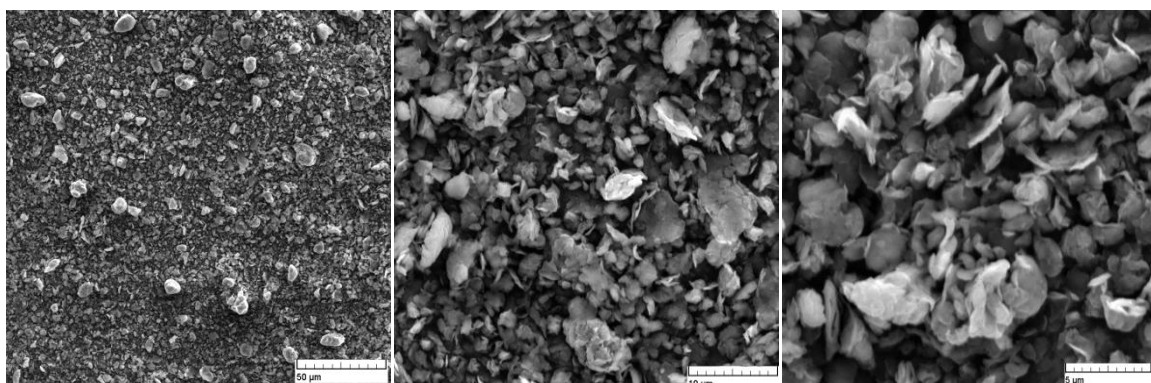


Obrázek 28.: Snímek SEM pro směs LDPE/0 % ADK/3 % POSS1 – nahoře vlevo zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x a vpravo 10000x



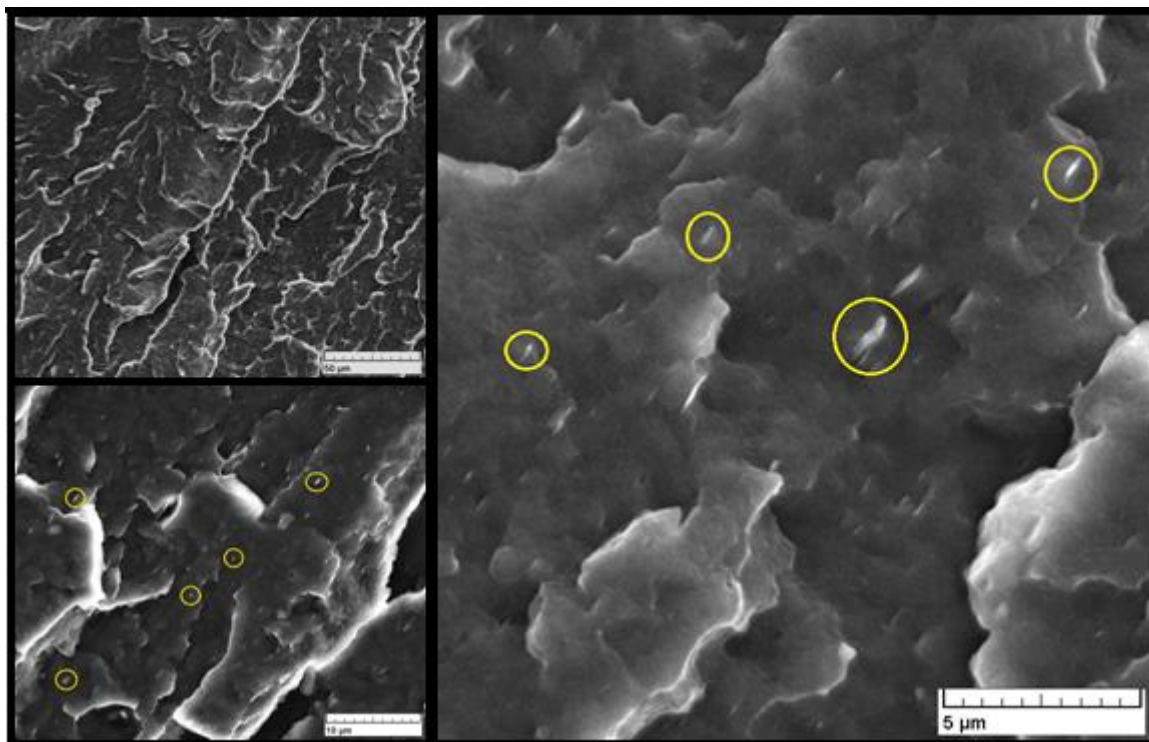
Obrázek 29.: Snímek SEM pro směs LDPE/29 % ADK/1 % POSS1 – nahoře vlevo zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x a vpravo 10000x

Na obrázku 29. jsou snímky směsi LDPE/29 % ADK/1 % POSS1. Na snímku při zvětšení 5000x je vidět plnivo POSS1 (žlutě značené) i retardér ADK (bíle značené). Ze snímků je vidět, že plnivo v matrici je dobře rozdispergováno a není kolem něj volný prostor



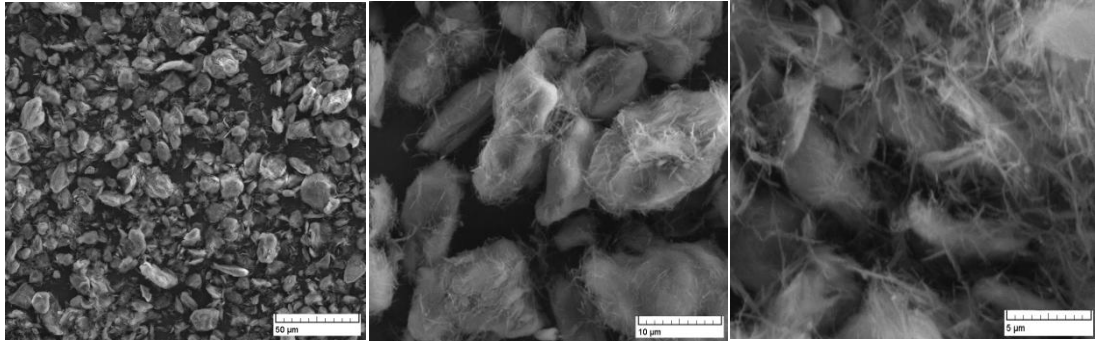
Obrázek 30.: Snímek SEM pro plnivo Perkalite - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x

Na obrázku 31. je snímek směsi LDPE/0 % ADK/3 % Perkalite. Plnivo (žlutě značené) bylo rovnoměrně dispergováno, ale na lomu byly viditelné dírký po vytržení plniva. Rovněž byla viditelná volná místa okolo částic plniva, což svědčí o nepříliš dobré adhezi plniva k polymeru. Snímky SEM ukazují, že nedošlo k úplné exfoliaci destiček, ale jen k částečné delaminaci.

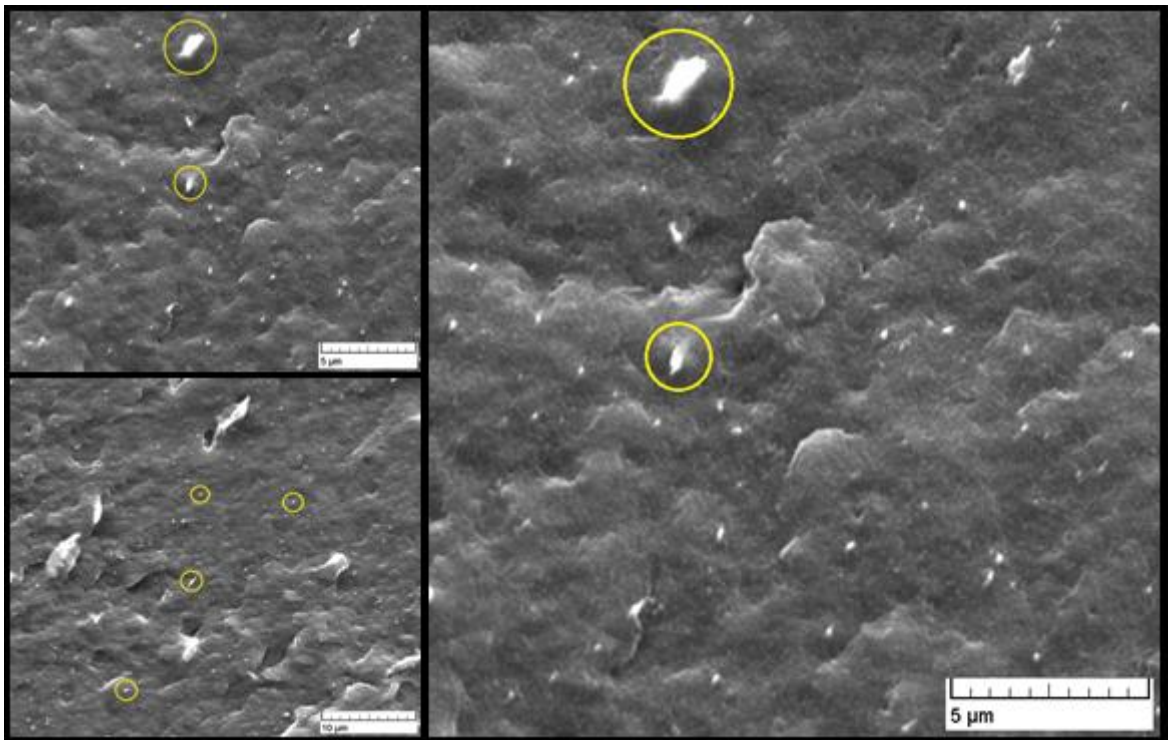


Obrázek 31.: Snímek SEM pro směs LDPE/0 % ADK/3 % Perkalite – nahoře vlevo zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x a vpravo 10000x

Na obrázku 32. je plnivo Pangel. Na obrázku 33. jsou směsi LDPE/0 % ADK/3 % Pangel. Plnivo (žlutě značené) bylo dobře dispergováno, ale na lomu byly viditelné dírký po vytržení částic plniva. Stejně jako u LDPE/0 % ADK/3 % Perkalite byla detekovatelná špatná adheze plniva k polymerní matici.



Obrázek 32.: Snímek SEM pro plnivo Pangel - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x



Obrázek 33.: Snímek SEM pro směs LDPE/0 % ADK/3 % Pangel - nahoře vlevo zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x, vpravo 10000x

11.4 Shrnutí

Plnivo bylo dobře dispergováno v matrici, ale u plniv Perkalite a Pangel byla detekována špatná adheze plniva a matrice.

ZÁVĚR

Vzhledem k neustále vyšším nárokům na vlastnosti výrobků je vývoj a výzkum nových, vylepšených, kompozitů stále v centru pozornosti. Význam dostávají spolu s běžnými plnivými i nanoplňiva. Nanoplňiva se od běžných plniv liší rozměrem, kdy alespoň jeden rozměr musí být v řádech od 1 do 100 nm. Zkoumán je především vliv nanoplňiv s běžnými retardéry hoření na hořlavost, tedy synergismus mezi nanoplňivými a retardéry hoření.

V odborných publikacích dosahují v oblasti hoření zlepšení, tedy zlepšení odolnosti proti hoření. Velmi často je zkoumán vliv uhlíkových nanotrubiček (CNT) s běžnými retardéry. Spolu s CNT jsou zkoumány synergické účinky nanoplňiv na bázi jílu s běžnými retardéry hoření. V obou případech je možné dosáhnout určitého zlepšení. Dříve se používaly halogenové retardéry, ale postupně se od nich upouští, protože škodí životnímu prostředí. Z tohoto důvodu se v současnosti dává přednost bezhalogenovým retardérům např. na bázi fosforu.

V měření hořlavosti bylo dosaženo určitého zlepšení jen u retardéru Exolite s přídavkem nanoplňiv. Nejlepších výsledků při měření s retardérem Exolite dosáhlo plňivo POSS 1. Dobrých výsledků bylo dosaženo také u směsí LDPE/POSS2/Exolite a LDPE/Dragonite(konzentrát)/Exolite. Při měření hořlavosti nanokompozitů PLA nebylo dosaženo žádného zlepšení a všechny testované nanokompozity dle ČSN EN 60695-11-10 nevyhověly.

U tahových zkoušek pevnost v tahu rostla, stejně rostlo i protažení. Nejvyšších hodnot dosahovali směsi LDPE/3 % plňiva. Nejvyšších hodnot dosáhla směs LDPE/ 3 % Dragonite /konzentrát).

Při měření reologických vlastností bylo získáno zlepšení viskozity při srovnání s čistým LDPE. Směsi LDPE/POSS 1 vykazovaly při plnění pouze 3% POSS 1 snížení viskozity a obou modulů. Obdobně se chovaly směsi LDPE/POSS 1. Srovná-li se viskozita ke směsím pouze se standardními retardéry hoření, dojde se k závěru, že viskozita klesá, což může být výhodné při zpracování. Jedinou výjimku tvoří směsi LDPE/Nanocyl, kdy došlo k výraznému zvýšení viskozity i modulů v závislosti na plnění. Přestože to může způsobovat problém při zpracování, zvýšení viskozity poskytlo zlepšení v rámci hořlavosti. Díky vysoké viskozitě nedocházelo k odkapávání hořících částí.

Krystalinita se obecně proti čistému LDPE snížila, ale právě nižší krystalinita může být výhodná – lepší se např. průhlednost.

U morfologie polymerů byla zjištěna dobrá dispergace plniv. Přesto se u dvou vzorků projevila špatná adheze plniva k matrici a docházelo k vytrhávání částic.

Shrnou-li se výsledky pro jednotlivá plniva a jejich vliv na vlastnosti směsí, zjistí se, že nejlepších vlastností dosahovali směsi LDPE/POSS 1.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Mleziva J.; Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití; Sobotáles, Praha 2000; s. 259; ISBN 80-85920-72-7
- [2] Stoklasa K.; Makromolekulární chemie II., učební texty, UTB FT Zlín
- [3] (2012-11-18) Resinex; Polyethylen; chemický vzorec PE; dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pe.html>
- [4] (2012-02-21) © Sloznaft; logo firmy; dostupné z: <http://www.sloznaft.sk/sk/>
- [5] (2013-02-21) © Sloznaft; technické údaje materiálu; dostupné z: http://www.sloznaft.sk/sk/obchodni_partneri/petchem/vyrobky/tvk-ldpe/
- [6] (2012-02-21) Low density Polyethylene; MAG Recycling services; dostupné z: <http://www.magrecycling.com.au/RecycledProducts/LDPE.aspx>
- [7] Stejskalová Z., PLA v obalovém průmyslu, UTB FT Zlín, 2009, bakalářská práce
- [8] Nieddu E.; Preparation and biodegradation of clay composites of PLA; Reactive & Functional Polymers; 69 (2009); s. 371–379
- [9] Enders H. J.; Engineering Biopolymers - Markets, Manufacturing, Properties and Applications; Hanser; Mnichov 2011; s. 82–86; ISBN 978-3-446-42403-6
- [10] (2012-02-21) Petruš J.; Kyselina polymléčná nejen jako biodegradabilní polymer; Chempoint; 2011; chemický vzorec PLA; dostupné z: <http://www.chempoint.cz/kyselina-polymlecna-nejen-jako-biodegradabilni-polymer>
- [11] Kucharczyk P.; Kyselina mléčná a syntéza polylaktidu, UTB FT Zlín, 2008, bakalářská práce
- [12] Murphy J.; Additives for Plastics Handbook; Elsevier Science Ltd.; Oxford 2001; s. 445; ISBN 1 85617 370 4
- [13] Navrátilová J.; Přísady do plastů, učební texty, UTB FT Zlín.
- [14] Wypych G.; Handbook of Filler; ChemTec Publishing; New York 2000; s. 875; ISBN 1-895198-19-4
- [15] (2013-4-13) <https://aiche.confex.com/aiche/s06/techprogram/images/36867-5.gif>
- [16] Wilkie Ch. A.; Morgan A. B.; Fire Retardancy of Polymeric Materials; CRC Press, Boca Raton 2010; s. 853; ISBN 978-1-4200-8399-6
- [17] (2013-4-15) idnes.cz; Na sídlištích v Brně hořely plastové kontejnery, žháři hrozí rok vězení; dostupné z: <http://brno.idnes.cz/na-sidlistich-v-brne-horely-plastove->

kontejnery-zhari-hrozi-rok-vezeni-1na-/brno-zpravy.aspx?c=A101020_131920_brno-zpravy_bor

[18] Münster L.; Modifikace hořlavosti polymerních materiálů a hodnocení efektivnosti těchto modifikací, UTB FT Zlín, 2011, bakalářská práce

[19] (2013-4-13) Polyvinylchlorid; Academic; chemický vzorec; dostupné z: <http://de.academic.ru/dic.nsf/dewiki/1121422>

[20] Cardelli A.; Effects of poly(dimethylsiloxane) and inorganic fillers in halogen free flame retardant poly(ethylene-co-vinyl acetate) compound: A chemometric approach

[21] ČSN ISO 4589-2, Plasty – Stanovení hořlavosti metodou kyslíkového čísla – Část 2.: Zkouška při teplotě okolí; Český normalizační institut; Praha 1998; s. 26

[22] ČSN EN 60695-11-10; Zkoušení požárního nebezpečí – Část 11-10: Zkoušky plamenem – zkouška plamenem o výkonu 50 W při vodorovné a při svislé poloze vzorku; Český normalizační institut; Praha 2000; s. 26

[23] Klouda, P.; Moderní analytické metody; Pavel Klouda; Ostrava 2003; s. 132; ISBN 80-86369-07-2

[24] Tirri T., Aubert M., Wilén C. E., Pfaendner R., Hoppe H.; Novel tetrapotassium azo diphosphonate (INAZO) as flame retardant for polyurethane adhesives; *Polymer Degradation and Stability*, 97 (2012), s. 375–382

[25] Lenza J., Merkel K., Rydarowski H.; Comparison of the effect of montmorillonite, magnesium hydroxide and a mixture of both on the flammability properties and mechanism of char formation of HDPE composites; *Polymer Degradation and Stability*; 97 (2012); s. 2581–2593

[26] Bourbigot S., Samyn F., Turf T., Duquesne S.; Nanomorphology and reaction to fire of polyurethane and polyamide nanocomposites containing flame retardants; *Polymer Degradation and Stability*; 95 (2010); s. 320–326

[27] Lei Ye, Qianghua Wu, Baojun Qu; Synergistic effects and mechanism of multiwalled carbon nanotubes with magnesium hydroxide in halogen-free flame retardant EVA/MH/MWNT nanocomposites; *Polymer Degradation and Stability*; 94 (2009); s. 751–756

[28] Ye L., Miao Y., Yan H., Li Z., Zhou Y., Liu J., Liu H.; The synergistic effects of boroxo siloxanes with magnesium hydroxide in halogen-free flame retardant EVA/MH blends; *Polymer Degradation and Stability*; 98 (2013); s. 868–874

- [29] Rahatekar S. S., Zammarano M., Matko S., Koziol K. K., Windle A. H., Nyden M., Kashiwagi T., Gilman J. W.; Effect of carbon nanotubes and montmorillonite on the flammability of epoxy nanocomposites; *Polymer Degradation and Stability*; 95 (2010); s. 870–879
- [30] Costa F. R., Wagenknecht U., Heinrich G.; LDPE/MgAl layered double hydroxide nanocomposite: Thermal and flammability properties; *Polymer Degradation and Stability*, 92 (2007), s. 1813–1823
- [31] Ke Ch. H., Li J., Ke-Yi Fang K. Y., Zhu Q. L., Zhu J., Yan Q., Wang Y. Z.; Synergistic effect between a novel hyperbranched charring agent and ammonium polyphosphate on the flame retardant and anti-dripping properties of polylactide; *Polymer Degradation and Stability*; 95 (2010); s. 763–770
- [32] (2013-05-13) Polyethylen granulat; Deiss
<http://www.deiss.de/de.php/informationen/muellsaecke.html>
- [33] Exolite AP 766; Technikal data; Clariant
- [34] ADK STAB FP 2200; Produkt data sheet; Adeka Palmarole
- [35] (2013-05-13) Nanocyl expands into North America; Netcomposites
- [36] Pangel S-9; technikal informatik; Tolsa
- [37] Perkalite; Technikal buletin; Akzo Nobel
- [38] Dragonite HP; Presentet by: Dr. Chrid DeArmitt; Applied Minerals
<http://www.netcomposites.com/news/nanocyl-expands-into-north-america/3849>
- [39] ČSN EN ISO 527-1, Plasty – Stanovení tahových vlastností Část 1: Obecné principy; úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2012, s. 28
- [40] Pohořelská D.; Mechanické vlastnosti kompozitů na bázi polypropylen/dřevní moučka; UTB FT Zlín; 2012; diplomová práce
- [41] Hasík P.; Reologie gelových a solových soustav přírodních polymerů a jejich modifikantů; UTB FT Zlín, Zlín 2007; diplomová práce
- [42] Hnilička J.; Studium možnosti hodnocení interkalace/exfoliace systému polymer/jíl; UTB FT Zlín; Zlín 2006; diplomová práce
- [43] Vondráček P.; Metody studia a charakterizace struktury polymerů; VŠCHT v Praze; Praha 1991; ISBN 80-7080-087-9

[44] Bílý T.; Fyzikální principy transmisní a skenovací elektronové mikroskopie; Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích; České budějovice 2007; bakalářská práce.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

LDPE	Nízkohustotní polyethylen
PLA	Polylaktid
ROP	ring opening polymerization – polymerace otevřením kruhu
CNT	Uhlíkové nanotrubičky
PE	Polyetylen
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
LLDPE	Lineární nízkohustotní polyetylen
terc.	Terciální
UV	Ultrafialové
ITT	Index toku taveniny
T_m	Teplota tání
E	E modul
PVC	polyvinylchlorid
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
CO	Oxid uhelnatý
F	Fluor
Cl	Chlor
Br	Brom
I	Jod
CO ₂	Oxid uhličitý
LOI	Limit oxygen index
TGA	Termogravimetrická analýza
HRR	Teplený výkon

TFIR	Fourier transform infrared (spectroscopy)
PA	Polyamid
TPU	Termoplastický polyuretan
MWCN	Vícevrstvé uhlíkové nanotrubičky
FR	fire retardant
PS	polystyren
PET	polyethylentereftalát
ABS	akrylobutadienstyren
PIB	Polymerní Institut Brno
G'	Elastický modul
G''	Viskozitní modul
RTG	rentgenové

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.: Struktura makromolekul různých typů PE: 1 – HDPE, 2 – LLDPE (krátké větvení), 3 – LDPE (dlouhé a krátké větvení, a – trubkový reaktor, b – autokláv) [1]	12
Obrázek 2.: Chemická struktura polyethylenu [3].....	12
Obrázek 3.: Schéma trubkového reaktoru pro výrobu LDPE [1]	13
Obrázek 4.: Logo firmy Sloznaft [4]	14
Obrázek 5.: Lahvičky vyrobené z LDPE [6]	15
Obrázek 6.: Chemický vzorec polylactidu (PLA) [10].....	16
Obrázek 7.: Stereometrie laktidu [11].....	17
Obrázek 8.: SEM fotografie Wollastonitu s jehlicovitým tvarem částic [15]	19
Obrázek 9.: Ohořené plastové kontejnery na třídění odpad [17].....	21
Obrázek 10.: Chemický vzorec PVC [19]	23
Obrázek 11.: Závislost HRR na čase: (1) HDPE, (6) HDPE/MMT5, (10) HDPE/OMMT5, (11) HDPE/EVA5/OMMT5 [25]	27
Obrázek 12.: Závislost HRR na čase pro dané kompozitní materiály: pro kompozit PA 6/jíl a čistý PA 6 (a), pro kompozit TPU/MWNT a čistý TPU (b) [26].....	28
Obrázek 13.: Závislost HRR na čase pro TPU modifikovaný retardérem APP a plnivem MWNT [26].....	29
Obrázek 14.: Závislost HRR na čase pro čistý EVA a jeho nanokompozity [27].....	30
Obrázek 15.: Závislost LOI na hm. % plnění MWCNT [27]	31
Obrázek 16.: Závislost MLR na čase pro nanokompozity epoxy/MWNT [29]	32
Obrázek 17.: Závislost MLR na čase pro nanokompozity epoxy/MMT [29]	33
Obrázek 18.: Závislost HRR na čase pro nanokompozity LDPE/LDH [30]	34
Obrázek 19.: Závislost LOI na plnění pro nanokompozity LDPE/LDH [30]	34
Obrázek 20.: Granulát LDPE Bralen RB 2-62 [32].....	38
Obrázek 21.: TEM snímek Nanocyl NC7000 [33].....	39
Obrázek 22.: Physica MCR 501 (foto vlastní zdroj)	85
Obrázek 23.: Snímek SEM pro čisté LDPE - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x	100
Obrázek 24.: Snímek SEM pro plnivo Nanocyl - vlevo zvětšení 1000x, uprostře zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x	100

- Obrázek 25.: Snímek SEM pro směs LDPE/0 % ADK/3 % Nanocyl - nahoře vlevo
zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x, vpravo 10000x..... 101
- Obrázek 26.: Snímek SEM pro plnivo POSS1 - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed
zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x..... 101
- Obrázek 27.: Snímek SEM pro retardér ADK - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed
zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x..... 102
- Obrázek 28.: Snímek SEM pro směs LDPE/0 % ADK/3 % POSS1 – nahoře vlevo
zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x a vpravo 10000x..... 102
- Obrázek 29.: Snímek SEM pro směs LDPE/29 % ADK/1 % POSS1 – nahoře vlevo
zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x a vpravo 10000x..... 103
- Obrázek 30.: Snímek SEM pro plnivo Perkalite - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed
zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x..... 103
- Obrázek 31.: Snímek SEM pro směs LDPE/0 % ADK/3 % Perkalite – nahoře vlevo
zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x a vpravo 10000x..... 104
- Obrázek 32.: Snímek SEM pro plnivo Pangel - vlevo zvětšení 1000x, uprostřed
zvětšení 5000x a vpravo zvětšení 10000x..... 105
- Obrázek 33.: Snímek SEM pro směs LDPE/0 % ADK/3 % Pangel - nahoře vlevo
zvětšení 1000x, dole vlevo zvětšení 5000x, vpravo 10000x..... 105

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.: Složení kompozitů LDPE [25]	26
Tabulka 2.: Hodnocení hořlavosti pro nanokompozity HDPE [25]	27
Tabulka 3.: Složení nanokompozitů a výsledky měření LOI [27].....	29
Tabulka 4.: Data hořlavosti pro čistý EVA a jeho nanokompozity [27]	30
Tabulka 5.: Vyhodnocení hořlavosti LOI a UL 94 pro jednotlivé nanokompozity [28]	31
Tabulka 6.: Složení nanokompozitů LDPE/LDH [30]	33
Tabulka 7.: Složení nanokompozitů a výsledky hořlavosti [31]	35
Tabulka 8.: Složení LDPE kompozitů pro retardér Exolite AP 766.....	40
Tabulka 9.: Složení LDPE kompozitů pro retardér ADK STAB FP 2200	41
Tabulka 10.: Vlastnosti Cloisitů	42
Tabulka 11.: Složení PLA nanokompozitů.....	43
Tabulka 12.:Kritéria pro stanovení hořlavosti dle ČSN EN 60695-11-10	45
Tabulka 13.: Naměřená hořlavost pro čisté LDPE a směsi s retardéry	46
Tabulka 14.: Hořlavost pro směsi LDPE/ POSS 1/Exolite.....	47
Tabulka 15.: Hořlavost pro směsi LDPE/POSS 1/ADK.....	48
Tabulka 16.: Hořlavost pro směsi LDPE/POSS 2/Exolite.....	49
Tabulka 17.: Hořlavost pro směsi LDPE/POSS 2/ADK.....	50
Tabulka 18.: Hořlavost pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)/Exolite.....	51
Tabulka 19.: Hořlavost pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)/ADK.....	52
Tabulka 20.: Hořlavost pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)/Exolite	53
Tabulka 21.: Hořlavost pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)/ADK	54
Tabulka 22.: Hořlavost pro směsi LDPE/ Pangel /Exolite	55
Tabulka 23.: Hořlavost pro směsi LDPE/Pangel/ADK	56
Tabulka 24.: Hořlavost pro směsi LDPE/Perkalite/Exolite	57
Tabulka 25.: Hořlavost pro směsi LDPE/Perkalite/ADK.....	58
Tabulka 26.: Hořlavost pro směsi LDPE/Grafmax/Exolite.....	59
Tabulka 27.: Hořlavost pro směsi LDPE/Grafmax/ADK	60
Tabulka 28.: Hořlavost pro směsi LDPE/Nanocyl/Exolite.....	61
Tabulka 29.: Hořlavost pro směsi LDPE/Nanocyl/ADK.....	62
Tabulka 30.: Hořlavost pro nanokompozity s maticí PLA.....	63
Tabulka 31.: Mechanické vlastnosti pro čisté LDPE a směsi s retardéry.....	66
Tabulka 32.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/POSS 1	66

Tabulka 33.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/POSS 2	68
Tabulka 34.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Perkalite.....	70
Tabulka 35.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Pangel	73
Tabulka 36.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)	75
Tabulka 37.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Dragonite (prášek).....	77
Tabulka 38.: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Grafmax.....	79
Tabulka 39: Mechanické vlastnosti pro směsi LDPE/Nanocyl	81
Tabulka 40.: Vypočítaná krystalinita pro čisté LDPE a pro směsi s retardéry	94
Tabulka 41.: Vypočítaná krystalinita pro směsi LDPE	95

SEZNAM GRAFŮ

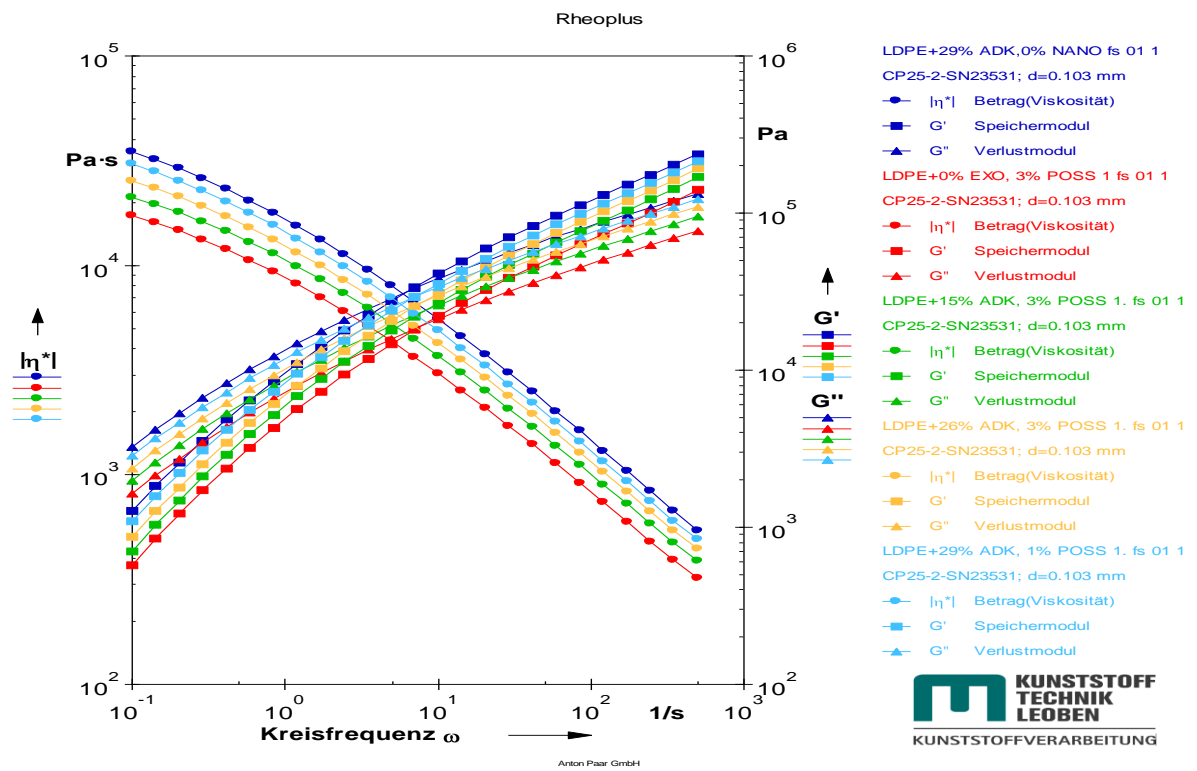
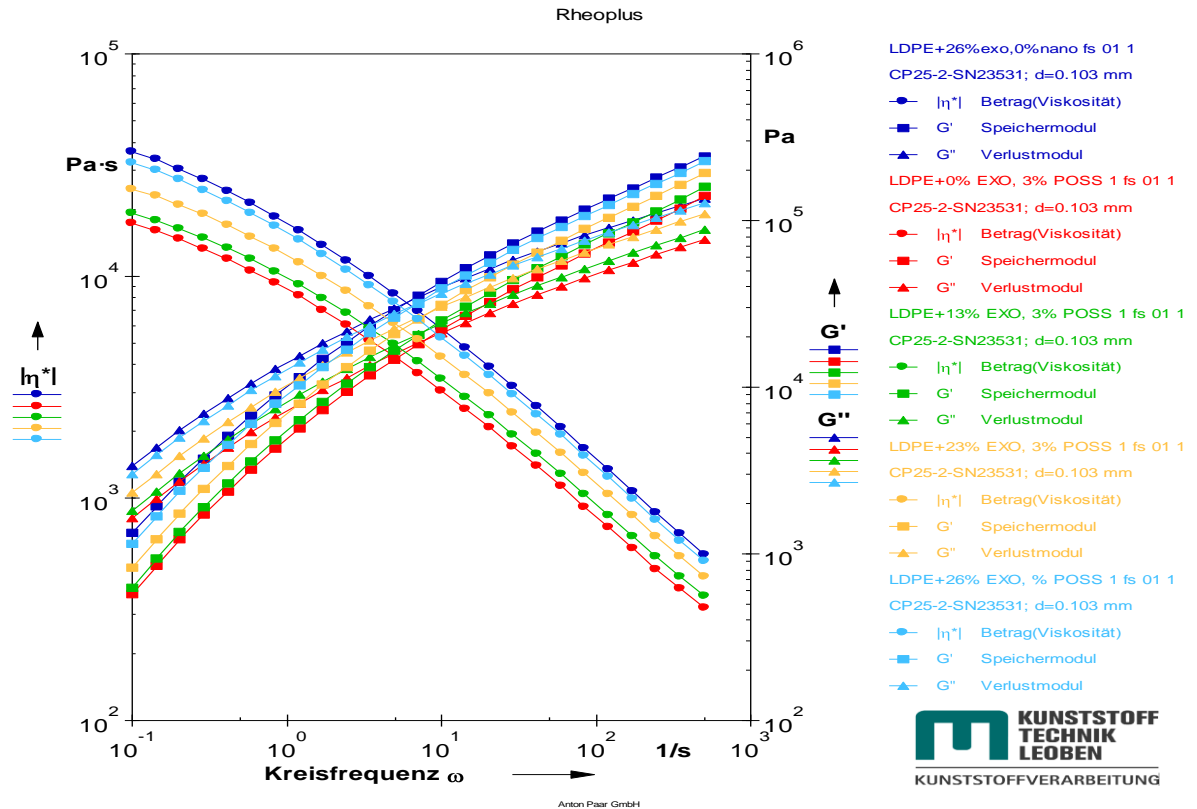
Graf 1.: Rozdíl t_f pro směsi LDPE/POSS 2/ADK	64
Graf 2.: Rozdíl t_f pro směsi LDPE/Dragonite (prášek)/ADK	64
Graf 3.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/POSS 1	67
Graf 4.: Tažnost pro směsi LDPE/POSS 1	67
Graf 5.: E modul pro směsi LDPE/POSS 1	67
Graf 6.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/POSS 2	69
Graf 7.: Tažnost pro směsi LDPE/POSS 2	69
Graf 8.: E modul pro směsi LDPE/POSS 2	69
Graf 9.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Perkalite.....	71
Graf 10.: Tažnost pro směsi LDPE/Perkalite.....	71
Graf 11.: E modul pro směsi LDPE/Perkalite.....	72
Graf 12.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Pangel	73
Graf 13.: Tažnosti pro směsi LDPE/Pangel.....	74
Graf 14.: E modul pro směsi LDPE/Pangel.....	74
Graf 15.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)	75
Graf 16.: Tažnost pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)	76
Graf 17.: E modul pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)	76
Graf 18.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Dragonite (prášek).....	77
Graf 19.: Tažnost pro směsi LDPE/Dragonite (prášek).....	78
Graf 20.: E modul pro směsi LDPE/Dragonite (prášek).....	78
Graf 21.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Grafmax.....	79
Graf 22.: Tažnost pro směsi LDPE/Grafmax.....	80
Graf 23.: E modul pro směsi LDPE/Grafmax.....	80
Graf 24.: Pevnost v tahu pro směsi LDPE/Nanocyl	81
Graf 25.: Tažnost pro směsi LDPE/Nanocyl	82
Graf 26.: E modul pro směsi LDPE/Nanocyl	82
Graf 27.: Závislost komplexní viskozity na frekvenci pro směsi LDPE/ POSS1/Exolit....	86
Graf 28.: Závislost elastického modulu na frekvenci pro čisté LDPE a směsi LDPE/POSS1/Exolit	87
Graf 29.: Závislost viskózního modulu na frekvenci pro čisté LDPE a směsi LDPE/POSS1/Exolit	87
Graf 30.: Závislost komplexní viskozity na frekvenci pro nanokompozity PLA.....	88

Graf 31.: Závislost komplexní viskozity na frekvenci pro nanokompozity PLA.....	89
Graf 32.: Závislost elastického modulu na frekvenci pro nanokompozity PLA	89
Graf 33.: Závislost elastického modulu na frekvenci pro nanokompozity PLA	90
Graf 34.: Závislost viskozitního modulu na frekvenci pro nanokompozity PLA.....	90
Graf 35.: Závislost viskozitního modulu na frekvenci pro nanokompozity PLA.....	91
Graf 36.: Srovnání komplexní viskozity čistého PLA, PLA/10A a PLA/Garamite	91

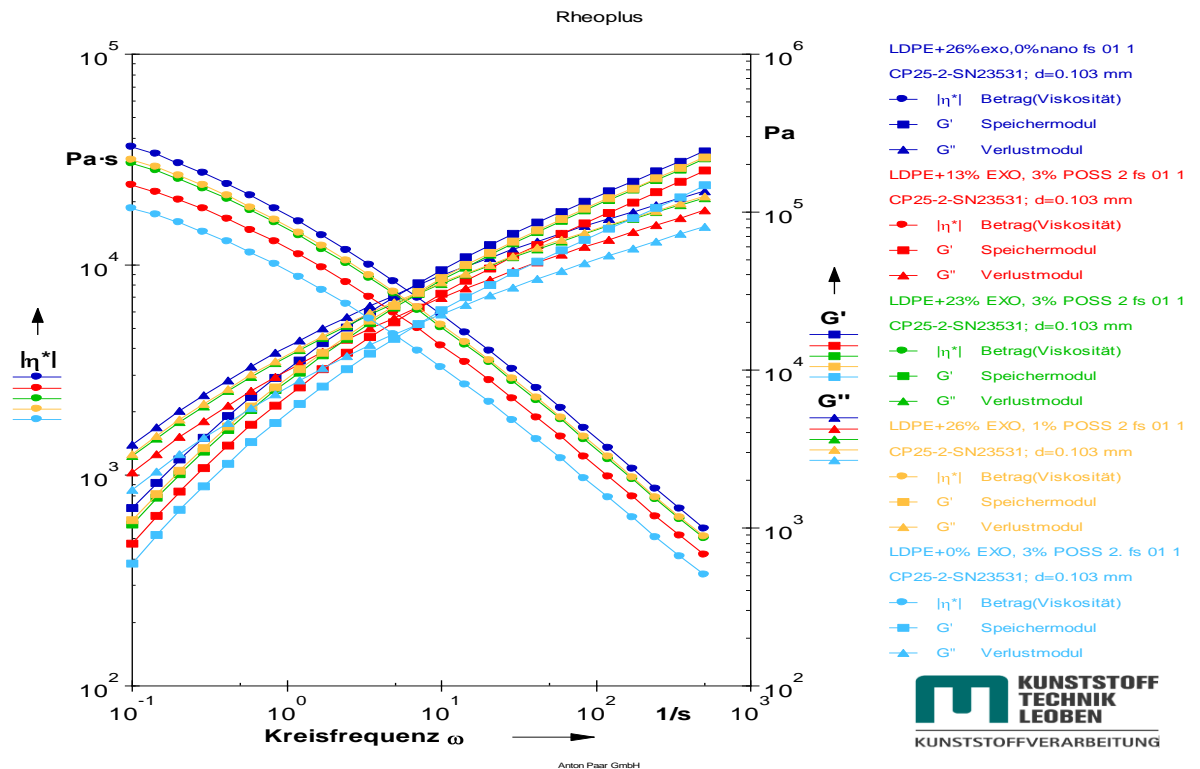
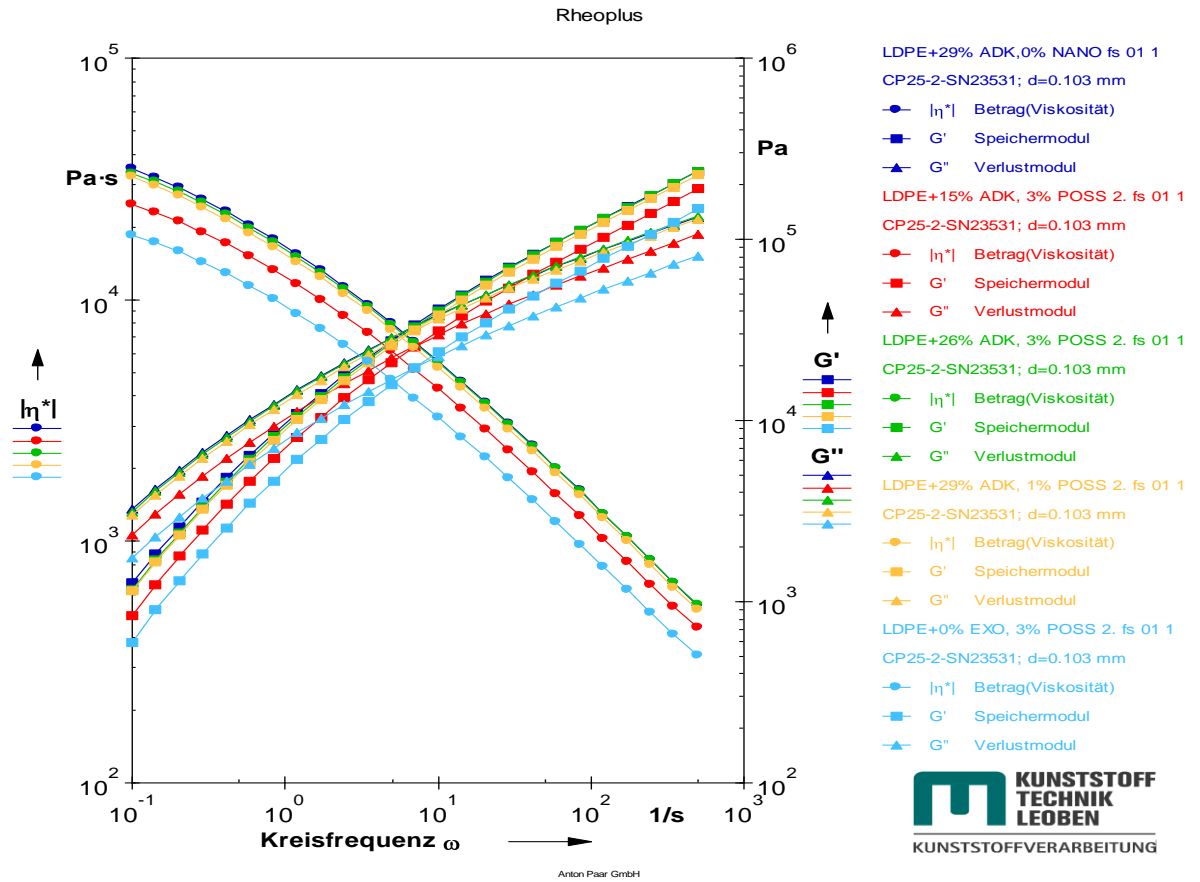
SEZNAM PŘÍLOH

- P I. Reologická data pro směsi LDPE/POSS 1
- P II. Reologická data pro směsi LDPE/POSS 2
- P III. Reologická data pro směsi LDPE/Perkalite
- P IV. Reologická data pro směsi LDPE/Dragonite (koncentrát)
- P V. Reologická data pro směsi LDPE/ Dragonite (prášek)
- P VI. Reologická data pro směsi LDPE/Grafmax
- P VII. Reologická data pro směsi LDPE/Pangel
- P VIII. Reologická data pro směsi LDPE/Nanocyl

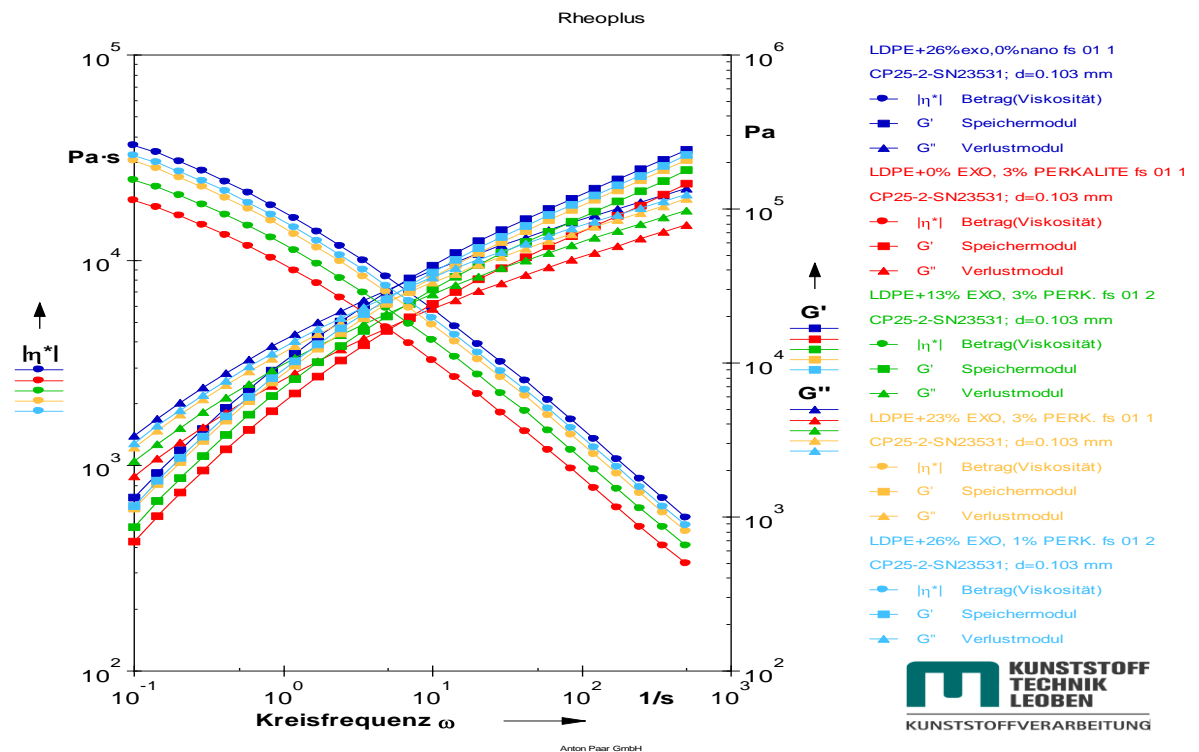
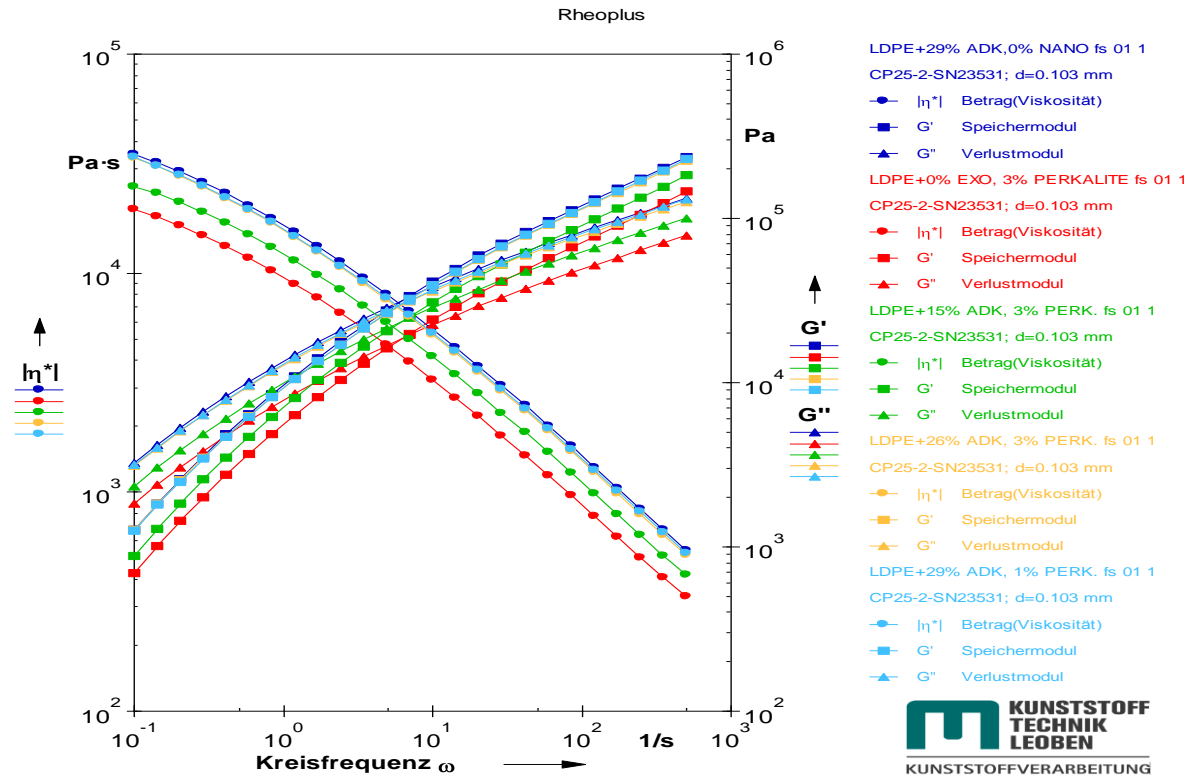
PŘÍLOHA P I: REOLOGICKÁ DATA PRO SMĚSI LDPE/POSS 1



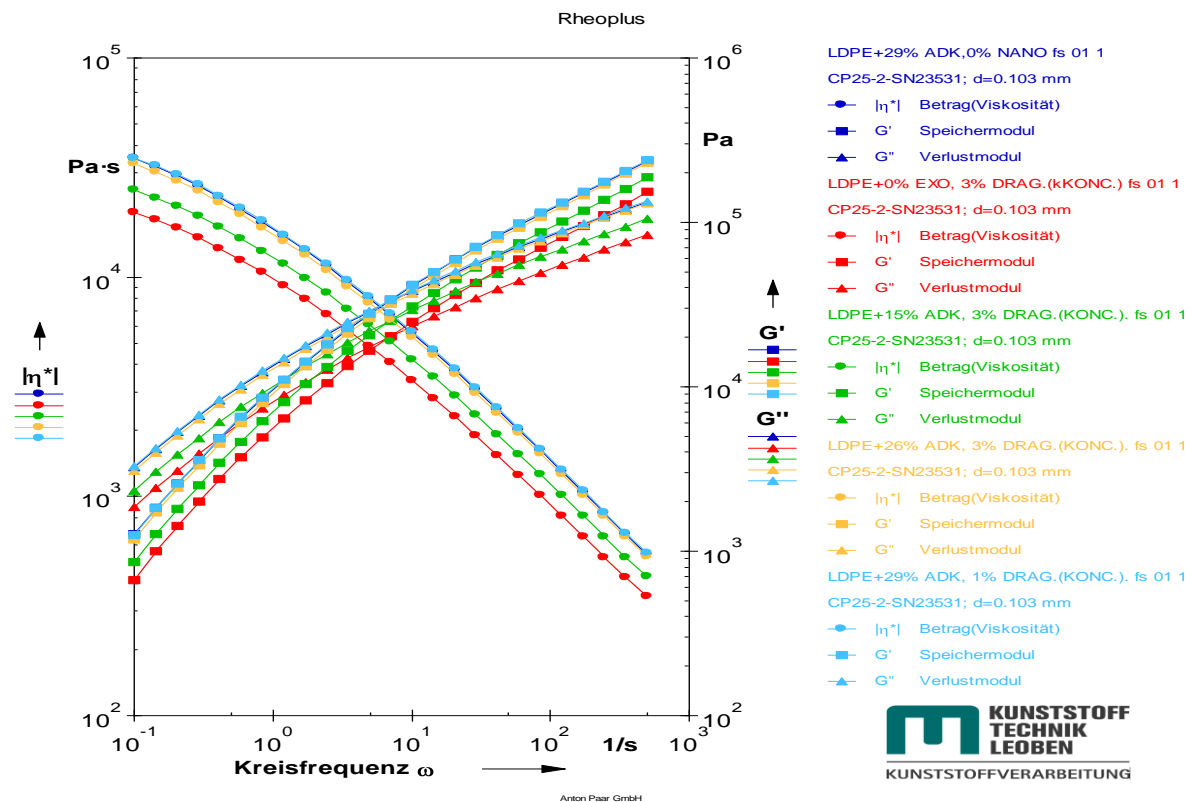
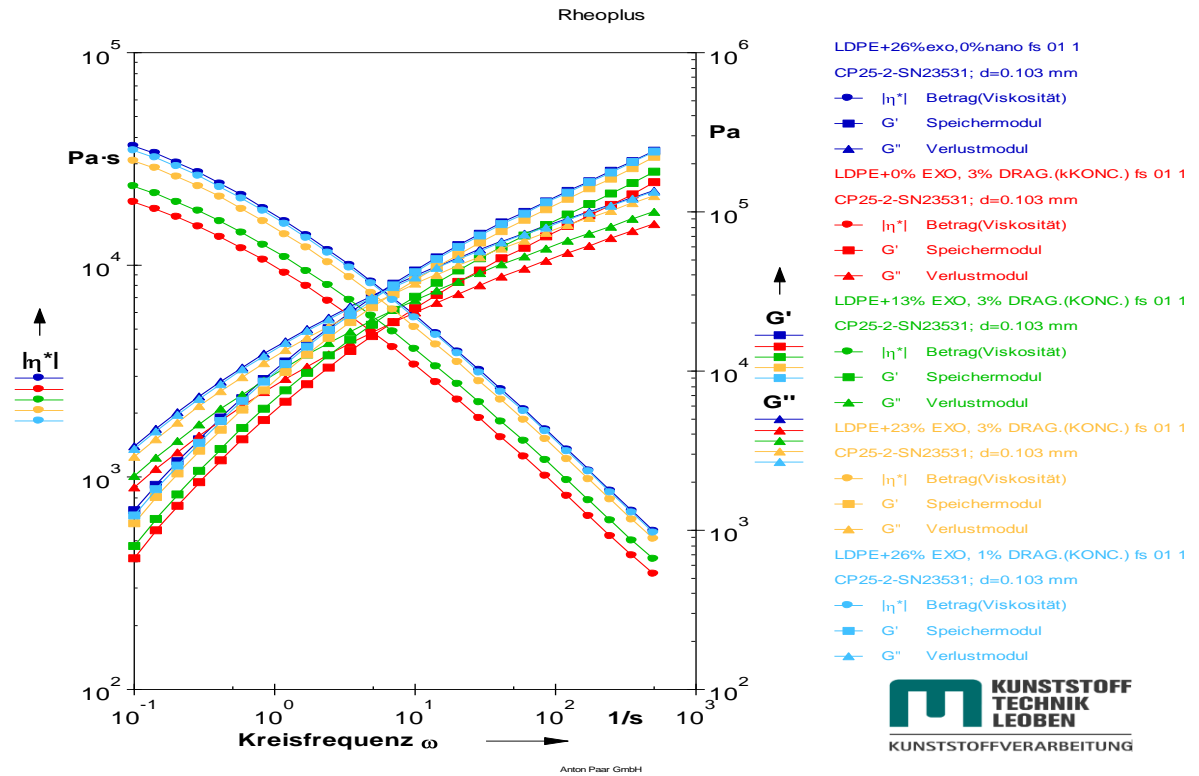
PŘÍLOHA P II: REOLOGICKÁ DATA PRO SMĚSI LDPE/POSS 2



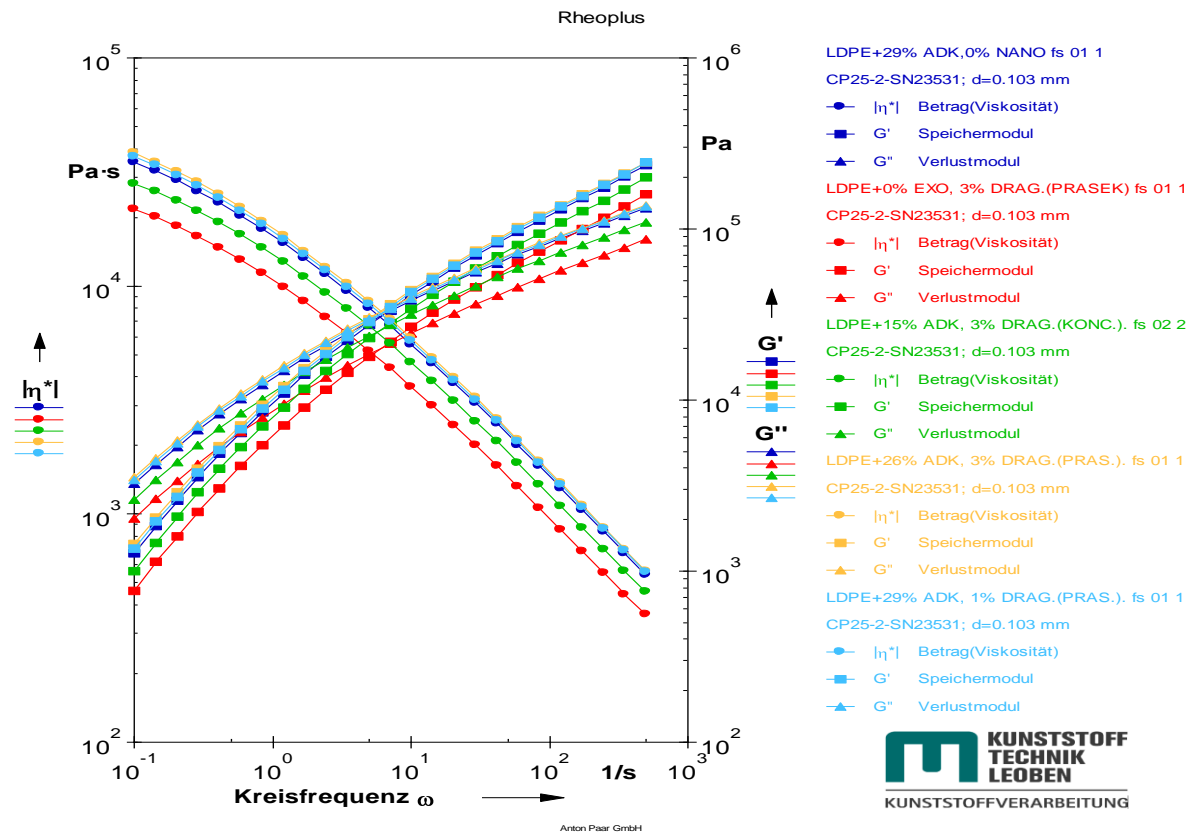
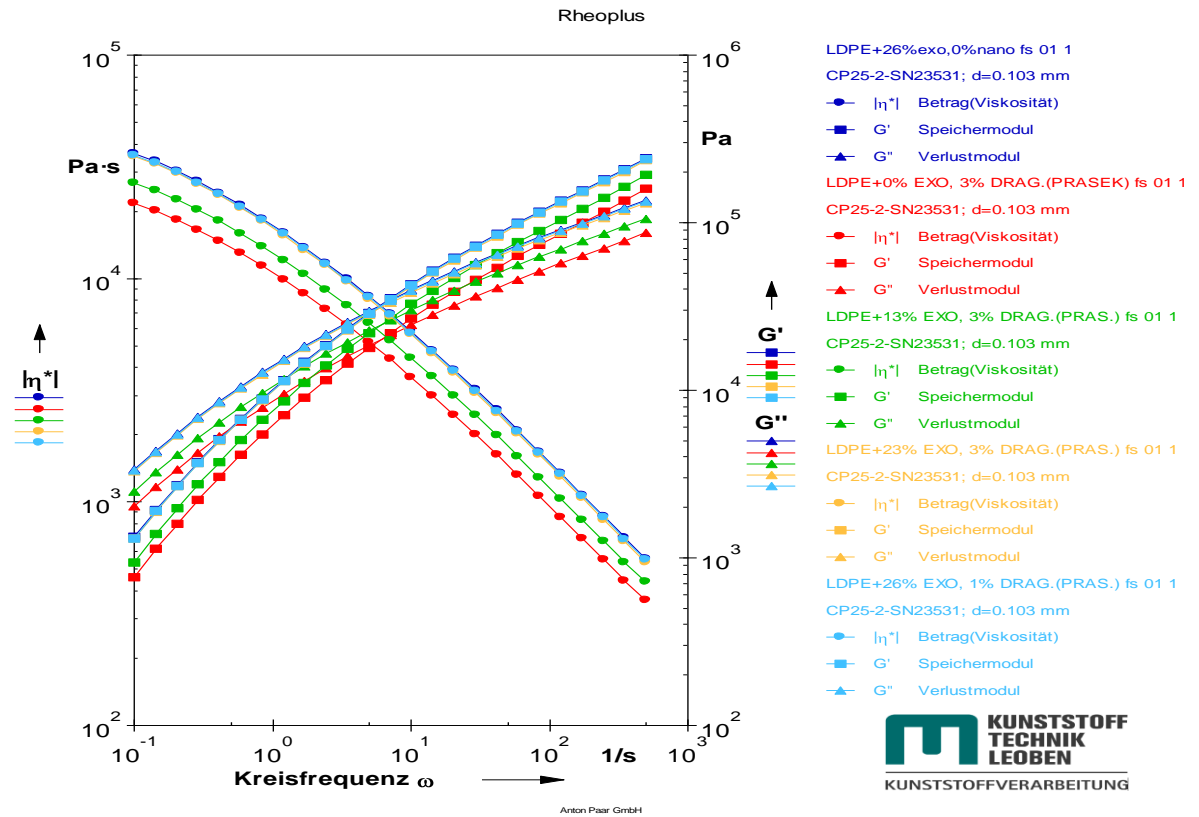
PŘÍLOHA P III: REOLOGICKÁ DATA PRO SMĚSI LDPE/PERKALITE



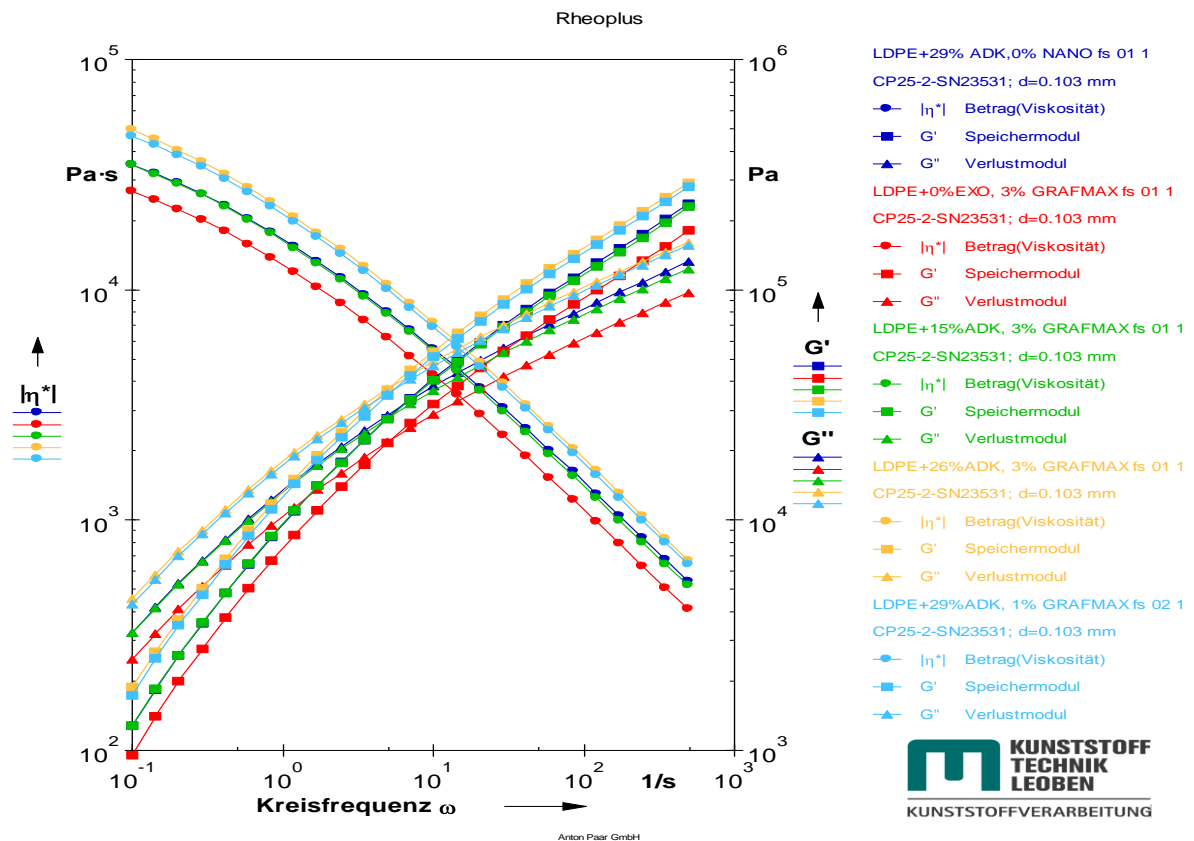
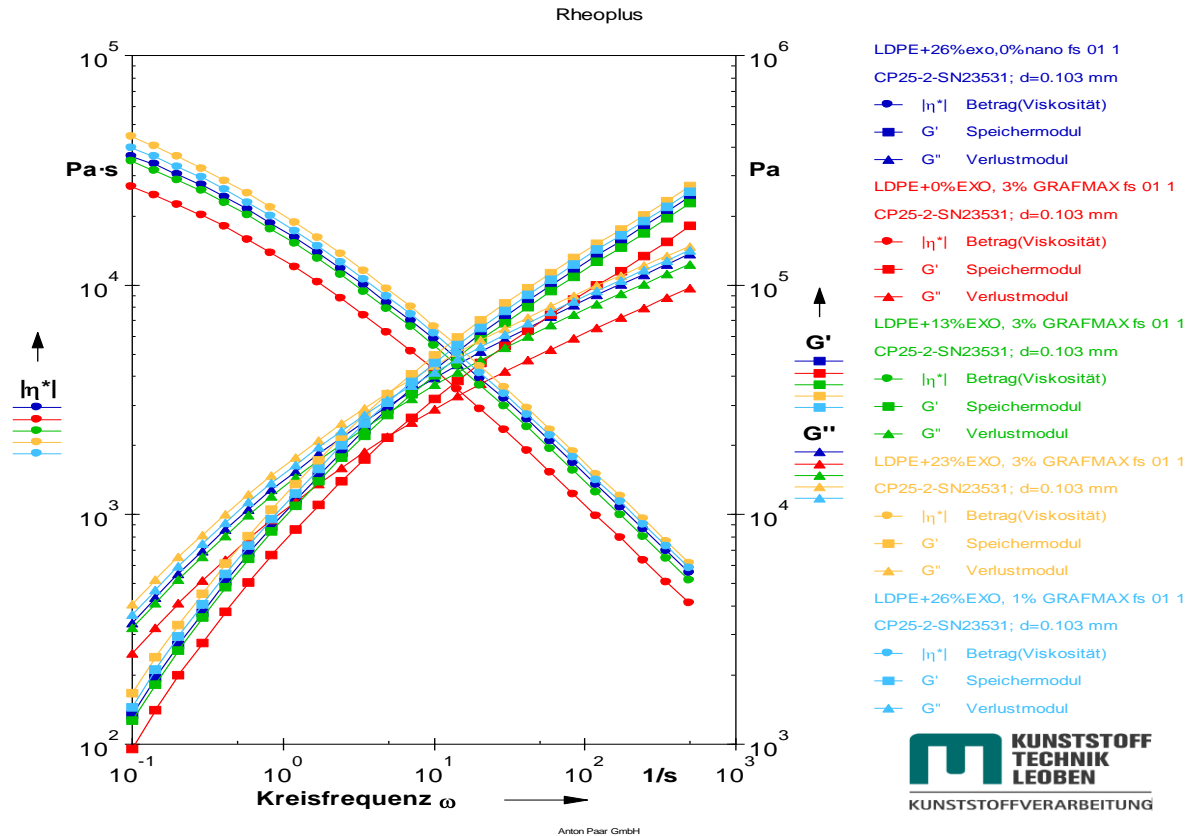
PŘÍLOHA P IV: REOLOGICKÁ DATA PRO SMĚSI LDPE/DRAGONITE (KONCENTRÁT)



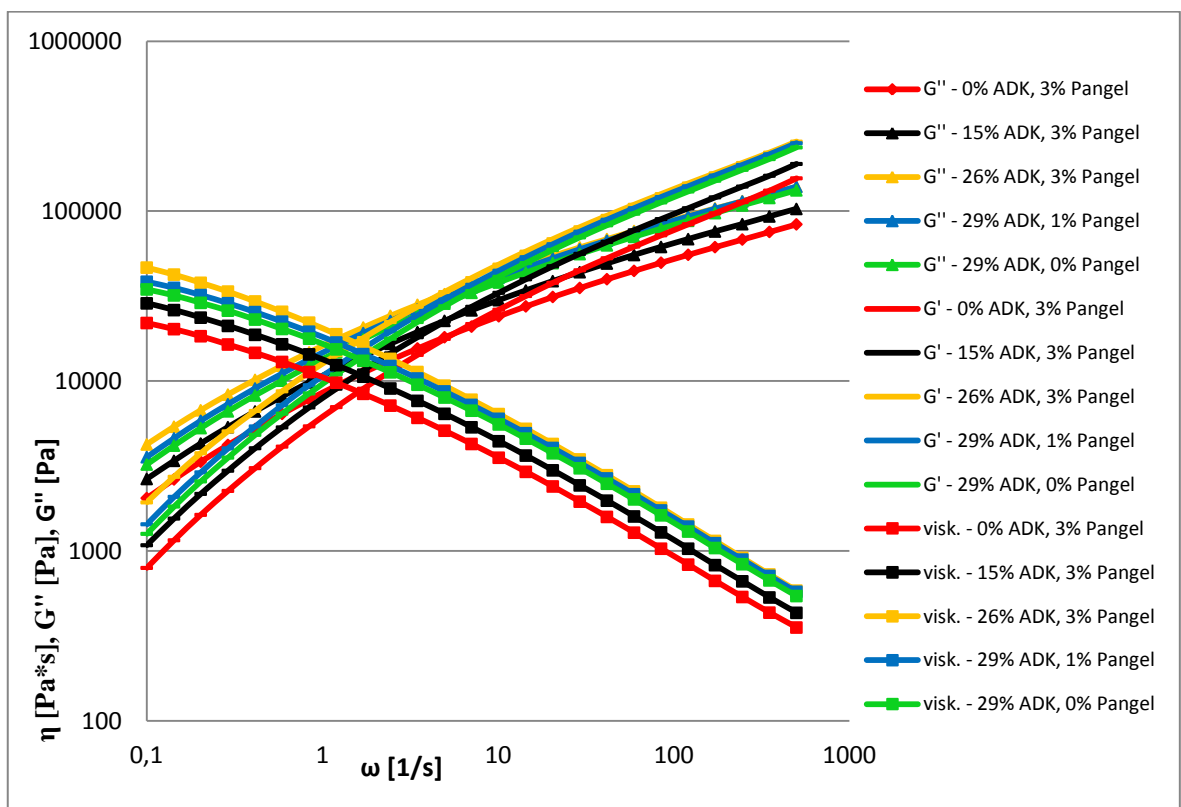
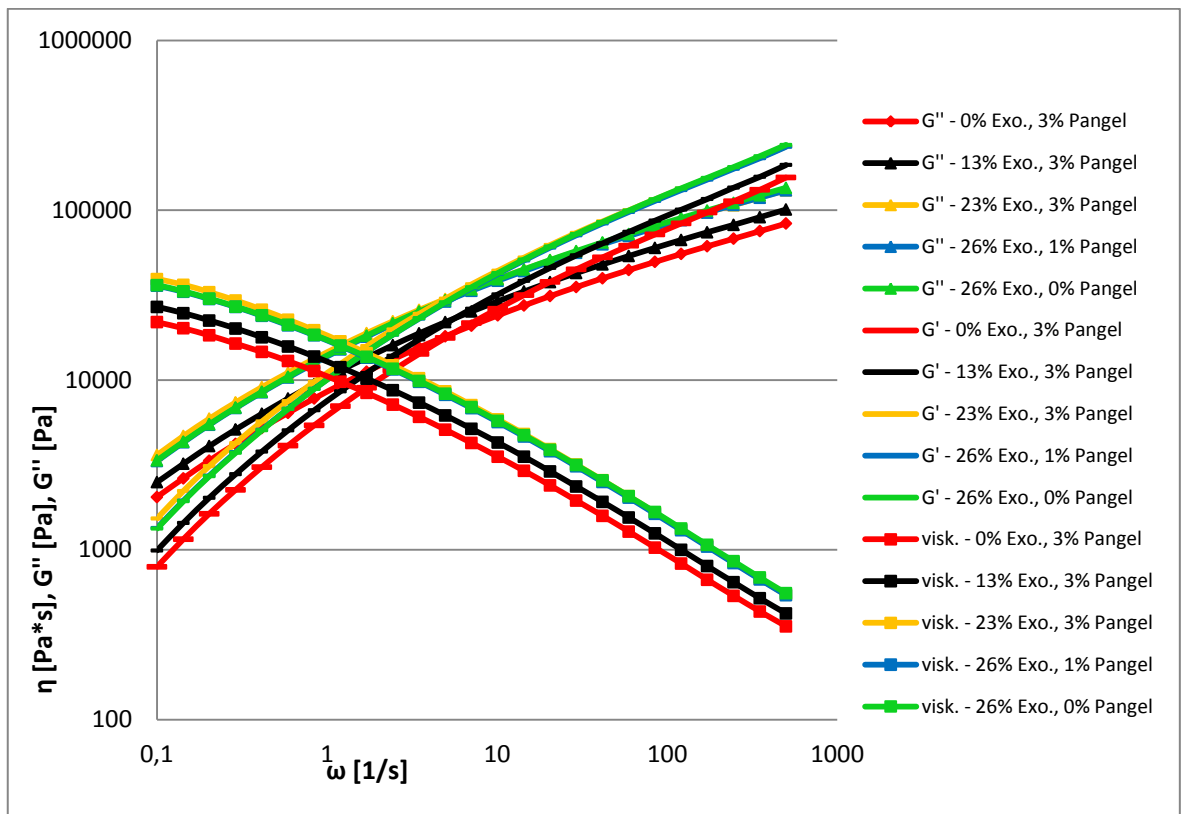
PŘÍLOHA P V: REOLOGICKÁ DATA PRO SMĚSI LDPE/DAGONITE (PRÁŠEK)



PŘÍLOHA P VI: REOLOGICKÁ DATA PRO SMĚSI LDPE/GRAFMAX



PŘÍLOHA P VII: REOLOGICKÁ DATA PRO SMĚSI LDPE/PANGEL



PŘÍLOHA P VIII: REOLOGICKÁ DATA PRO SMĚSI LDPE/NANOCYL

