

Vliv druhu a koncentrace kompatibilizátoru na vlastnosti plněného HDPE.

Bc. Ľuboš Botka

Diplomová práce
2015



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Luboš Botka**
Osobní číslo: **T13608**
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Vliv druhu a koncentrace kompatibilizátoru na vlastnosti plněného HDPE.**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod - plněné polymery
2. Polyolefiny (PE->HDPE)
3. Plniva do polymerů, mikroplniva->nanoplňiva
4. Kompatibilizátory
5. Závěr

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Alice Tesaříková Svobodová

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce:

30. ledna 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2015

Ve Zlíně dne 9. února 2015

doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

Příjmení a jméno: Botka Ľuboš

Obor: Výrobní inženýrství

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně 13. 5. 2015


.....

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 nevýdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledků obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k 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.

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cieľom diplomovej práce bolo zistiť vplyv kompatibilizátora na vlastnosti plneného HDPE. V teoretickej časti je stručne popísané rozdelenie polymérov, väčšia pozornosť je venovaná polyolefínom, najmä vysokohustotnému polyetylénu HDPE. V ďalšej časti sú popísané plnivá a kompatibilizátory. V praktickej časti boli charakterizované zmesi HDPE s pridaným kompatibilizátorom a daným plnivom. Na jednotlivých vzorkách boli merané mechanické vlastnosti, dynamická mechanická analýza a index toku taveniny.

Kľúčová slova: vysokohustotný polyetylén, kompatibilizátor, plnivo

ABSTRACT

The aim of the thesis was to find out the effects of compatibilizer on properties of filled HDPE. The theoretical part is described briefly polymer distribution, greater attention is given to polyolefins, especially high density polyethylene HDPE. The next section describes fillers and compatibilizers. In the practical part they were characterized by mixtures of HDPE and compatibilizer added by the filler. The individual samples were measured mechanical properties, dynamic mechanical analysis and melt flow rate.

Keywords: high density polyethylene, compatibilizer, filler

Veľmi rád by som sa poďakoval vedúcej mojej diplomovej práce Ing. Alici Tesaříkovej Svobodovej a taktiež doc. Ing. Dagmar Meřínskej, Ph.D., za ich vedenie, rady, pomoc, kritiku, trpezlivosť, čas a ochotu pri tvorbe tejto práce. Ďalej sa chcem poďakovať celej mojej rodine, blízkym a priateľke, ktorí ma po celú dobu môjho štúdia motivovali a podporovali.

Prehlasujem, že odovzdaná verzia diplomovej práce a verzia elektronická nahraná do IS/STAG sú totožné.

V Zlíne 13. 5. 2015

.....

Ľuboř Botka

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČASŤ	11
1 POLYMERNÉ MATERIÁLY	12
1.1 ROZDELENIE POLYMÉROV	12
1.1.1 Rozdelenie podľa pôvodu	12
1.1.2 Rozdelenie podľa elasticko-plastických vlastností	12
1.1.3 Rozdelenie podľa chemickej reakcie, ktorou vznikli.....	13
1.1.4 Podľa nadmolekulárnej štruktúry (podľa stupňa usporiadanosti).....	13
1.1.5 Delenie z hľadiska molekulárnej štruktúry	14
1.1.6 Podľa druhu prísad	15
2 POLYOLEFINY	16
2.1 POLYETYLÉN.....	16
2.2 ROZDELENIE POLYETYLÉNOV.....	17
2.3 HDPE VYSOKOHUSTOTNÝ POLYETYLÉN	18
2.3.1 Vlastnosti HDPE	18
2.4 LDPE NÍZKOHUSTOTNÝ POLYETYLÉN.....	18
2.4.1 Vlastnosti LDPE.....	19
2.5 POROVNANIE VLASTNOSTÍ TYPOV POLYETYLÉNU	19
2.6 SPRACOVANIE A POUŽITIE TYPOV POLYETYLÉNOV	22
3 PLNIVÁ	25
3.1 CHEMICKÉ ZLOŽENIE ČASTICOVÝCH PLNÍV	25
3.2 HUSTOTA	25
3.3 VLASTNOSTI ČASTICOVÝCH KOMPOZITOV.....	26
3.3.1 Vplyv tvaru častíc plniva	28
3.4 FYZIKÁLNA A CHEMICKÁ MODIFIKÁCIA DISPERZNÝCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV	28
3.5 NANOPLNIVÁ.....	30
3.5.1 Vrstevnaté silikáty.....	31
3.5.2 Uhlíkové nanorúrky	32
4 KOMPATIBILIZÁTORY	34
II PRAKTICKÁ ČASŤ	35
5 STANOVENIE CIEĽOV DIPLOMOVEJ PRÁCE	36
6 POUŽITÉ MATERIÁLY	37
6.1 VYSOKOHUSTOTNÝ POLYETYLÉN – HDPE.....	37
6.2 MALENIZOVANÝ POLYETYLÉN - MAPE	38
6.3 MODIFIKOVANÝ ÍL – CLOISITE [®] 25A	38
6.4 OXID TITANIČITÝ TiO ₂	38
6.5 UHLIČITAN VÁPENATÝ CaCO ₃	39
7 PRÍPRAVA SKÚŠOBNÝCH TELIESOK	40
8 POUŽITÉ ZARIADENIA	41

8.1	VYTLAČOVACÍ STROJ	41
8.2	MERACIE ZARIADENIE DMA.....	42
8.3	UNIVERZÁLNY SKÚŠOBNÝ STROJ.....	43
8.4	KAPILÁRNY VYTLAČOVACÍ PLASTOMETER.....	44
9	PREVEDENÉ MERANIA.....	45
9.1	MERANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	45
9.1.1	Výsledky merania medzi pevnosti v ťahu.....	46
9.2	MERANIE DYNAMICKEJ MECHANICKEJ ANALÝZY DMA	55
9.2.1	Výsledky merania elastického modulu pružnosti	55
9.3	MERANIE INDEXU TOKU TAVENINY	59
9.3.1	Výsledky merania indexu toku taveniny.....	59
	ZÁVER	61
	ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	63
	ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	66
	ZOZNAM OBRÁZKOV	68
	ZOZNAM TABULIEK	69
	ZOZNAM PRÍLOH.....	70

ÚVOD

V dnešnej dobe sú polymérne materiály všade okolo nás. Stretávame sa s nimi skoro na každom kroku. Deti sa hrajú s hračkami vyrobenými z polymérnych materiálov, používame PET fľaše na uskladnenie nápojov, využívame polymérne fólie, kelímky atď. na balenie rôznych potravín. Polymérne materiály sú pomerne ľahko dostupné materiály, ktoré sa človek naučil veľmi efektívne využívať, kvôli ich výborným mechanickým a hlavne chemickým vlastnostiam. Pre zlepšenie týchto vlastností sa snažíme polyméry modifikovať a pridávame do nich rôzne druhy plnív. Najdôležitejšou prísadou v zmesi tvorenej dvoma alebo viacerými polymérmi sú kompatibilizátory. Sú to látky zlepšujúce príľnavosť komponentov polyméru a pôvodného alebo organicky modifikovaného ílu. Cieľom kompatibilizácie je získať ustálenú a rovnorodú disperziu, ktorá bude mať požadované vlastnosti, napr. zníži povrchové napätie a tým umožní lepšiu dispergáciu a vďaka tomu zlepši mechanické vlastosti výrobku z polymerných zmesí.

Diplomová práca sa zaoberá vplyvom kompatibilizátorov na vlastnosti plneného HDPE. Čitateľ sa v tejto práci zoznámí s polymérmi, ich modifikáciami a meraním mechanických, dynamických mechanických vlastností a indexu toku taveniny. V závere práce sú údaje z týchto meraní štatisticky spracované a vyhodnotené.

I. TEORETICKÁ ČASŤ

1 POLYMERNÉ MATERIÁLY

Polyméry sú látky pozostávajúce z molekúl jedného alebo viac druhov atómov alebo skupín spojených navzájom v tak veľkom počte, že rad fyzikálnych chemických vlastností týchto látok sa nezmení pridaním alebo odobratím jednej alebo viacerých konštitučných jednotiek. To, čo polyméry odlišuje od iných materiálov je reťazcová štruktúra ich molekúl. Reakcie, ktorými makromolekulové látky vznikajú nazývame výstavbové reakcie. Vlastnosti polymérov sú v zásade určené chemickým zložením makromolekulového reťazca a jeho štruktúrou. V súčasnosti sa polyméry v čistom stave využívajú pomerne zriedkavo a vysoko špecifikované úžitkové vlastnosti sa dosahujú ich kombináciou alebo pridávaním rozmanitých aditív. Polymérne materiály sa používajú v skupenstve kvapalnom, alebo tuhom. [1]

1.1 Rozdelenie polymérov

1.1.1 Rozdelenie podľa pôvodu

- Prírodné polymérne materiály - bielkoviny, celulóza, kaučuk, z ktorých možno vyrobiť technické polymérne materiály napr. gumu, celuloid, celofán.
- Syntetické polymérne materiály - vznikli polymerizačnými reakciami z nízkomolekulových organických i anorganických látok (napr. polyetylén, polystyrén, epoxid, polytetrafluóretylén, polymetylmakrylát, silikóny). [1]

1.1.2 Rozdelenie podľa elasticko-plastických vlastností

- **termoplasty** - jedná sa o polymérové materiály, ktoré pri zahrievaní prechádzajú do plastického stavu, do stavu vysoko viskózných neneutronovských kvapalín, kde je možné ľahko tvarovať a spracovávať rôznymi technológiami. Do tuhého stavu prejdú ochladením pod teplotu tavenia T_m (semikryštalické plasty), resp. teplotu viskózneho toku T_f (amorfné plasty). Pretože pri zahrievaní nedochádza k zmenám chemickej štruktúry, možno proces mäknutia a následného tuhnutia opakovať teoreticky bez obmedzenia. jedná sa iba o fyzikálny proces. K termoplastom patrí väčšina spracovávaných hmôt, ako je polyetylén (PE), polypropylén (PP), polystyrén (PS), polyvinylchlorid (PVC), polyamid (PA), atď.[2]

- **reaktoplasty** - jedná sa o polymérne materiály, predtým nazývané termosety, ktoré tiež v prvej fáze zahrievania mäknú a dajú sa tvarovať, ale len obmedzenú dobu. Počas ďalšieho zahrievania dochádza k chemickej reakcii - priestorovému zosieťovaniu štruktúry, k tzv. vytvrdzovaniu. Výrobok je možné považovať za jednu veľkú makromolekulu. Ochladzovanie reaktoplastov prebieha mimo nástroj, pretože zabezpečenie rýchleho ohrevu formy pri vytvrdnutí a následnom rýchlom ochladení materiálu by bolo ťažké. Tento dej je nevratný a vytvrdené plasty nemožno roztaviť ani rozpustiť, ďalším zahrievaním dôjde k rozkladu hmoty (degradácii). Patria sem fenolformaldehydové hmoty, epoxidové živice, polyesterové hmoty, a pod. [2]
- **kaučuky, gumy a elastoméry** - jedná sa o polymérne materiály, ktoré tiež v prvej fáze zahrievania mäknú a dajú sa tvarovať, ale len obmedzenú dobu. Počas ďalšieho zahrievania dochádza k chemickej reakcii - priestorovému zosieťovaniu štruktúry tzv. vulkanizácii. U elastomérov na báze termoplastov nedochádza k zmenám chemickej štruktúry, proces mäknutia a následného tuhnutia možno opakovať teoreticky bez obmedzenia, prebiehajú tu len fyzikálne deje. [2]

1.1.3 Rozdelenie podľa chemickej reakcie, ktorou vznikli

- polymeráty vznikli polymerizáciou.
- polykondenzáty vznikli polykondenzáciou.
- polyadukty vznikli poladíciou.

1.1.4 Podľa nadmolekulárnej štruktúry (podľa stupňa usporiadanosti)

- **amorfné plasty**, kde makromolekuly zaujímajú úplne náhodnú pozíciu. Patrí sem napr PS, PMMA, PC, a pod. Sú charakteristické tvrdosťou, krehkosťou, vysokou pevnosťou, modulom pružnosti a sú vzhľadom k nízkemu indexu lomu (1,4 až 1,6) priehľadné, resp. podľa priepustnosti svetla číre (92% priepustnosti svetla), transparentné alebo priehľadné (60% priepustnosti svetla). Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti α je menší, než u semikryštalických polymérov. Použitelnosť amorfných polymérov je do teploty skelného prechodu T_g . [1]

- **kryštalické (semikryštalické) plasty**, ktoré vykazujú určitý stupeň usporiadanosti. Ten sa označuje ako stupeň kryštalinity (pohybuje sa od 40% do 90%) a vyjadruje relatívny podiel usporiadaných oblastí, uložených medzi oblasťami amorfnými. Nemôže nikdy dosiahnuť 100%, preto sa kryštalické plasty označujú ako semikryštalické. Patrí sem PE, PP, PA, PTFE, POM, atď. Sú mliečno zakalené, index lomu je väčší a sú charakterizované húževnatosťou materiálu, pevnosťou a modul pružnosti rastie so stupňom kryštalinity. Použitelnosť semikryštalických plastov je do teploty tavenia T_m . [1]

1.1.5 Delenie z hľadiska molekulárnej štruktúry

- **Lineárne makromolekuly** - vznikajú tak, že sa monoméne molekuly radia jedna vedľa druhej. Lineárne makromolekuly sa môžu z priestorových dôvodov viac priblížiť jedna k druhej a vyplniť tak kompaktnější priestor. Polyméry potom majú vyššiu hustotu (napr. vysokohustotný polyetylén HDPE). Lineárne makromolekuly ľahšie vytvárajú priestorovo pravidelné zhluky kryštalických štruktúr, takže tieto polyméry majú vyšší obsah kryštalických podielov. Plasty s lineárnymi makromolekulami sú obvykle dobre rozpustné a tavitelné (dobrá pohyblivosť makromolekúl), v tuhom stave sa vyznačujú húževnatosťou a vo forme tavenín dobrou spracovateľnosťou. [2]
- **Rozvetvené makromolekuly** sa vyznačujú tým, že majú na základnom reťazci bočné vetvy. Rozvetvené makromolekuly sa na rozdiel od lineárnych makromolekúl nemôžu v dôsledku bočných vetiev jedna k druhej dostatočne priblížiť. Preto sa vyznačujú nižšou hodnotou hustoty (napr. nízko-hustotný polyetylén LDPE). Usporiadanosť ich zhlukov je nízka a teda horšie kryštalizujú a majú nižší stupeň kryštalinity.
- **Zosieťované makromolekuly** - v tomto prípade je niekoľko priamych alebo rozvetvených makromolekulárnych reťazcov medzi sebou prepojené väzbami, takže vytvárajú jednu takmer nekonečnú makromolekulu - priestorovú sieť. Takáto sieť vedie k strate tavitelnosti a rozpustnosti polyméru. Polyméry vykazujú vysokú tvrdosť, tuhosť a odolnosť proti zvýšenej teplote, ale nízku odolnosť proti rázovému namáhaniu

1.1.6 Podľa druhu prísad

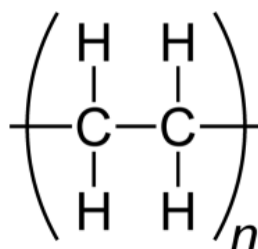
- **neplnené plasty** - neplnený plast je taký plast, u ktorého množstvo prísad neovplyvňuje vlastnosti polymérnej matrice.
- **plnené plasty** - plnivo ovplyvňuje fyzikálne a mechanické vlastnosti plastu. Makromolekulárnej látka plní funkciu spojiva a určuje základné fyzikálne a mechanické vlastnosti hmoty. Prísadou môžu byť plnivá, stabilizátory, mazivá, farbivá, zmäkčovadlá, iniciátormi, nadúvadla, tvrdidla, retardéry horenia, apod. Plnivá zlepšujú buď mechanické vlastnosti materiálu, alebo chemickú odolnosť či tvarovú stálosť pri zvýšenej teplote, iné jednoducho len hmotu zlacňujú.

2 POLYOLEFINY

2.1 Polyetylén

Polyetylén - je semikryštalická látka s podielom kryštalickej fázy v rozmedzí 50 až 85 %. Kryštalické fázy zabezpečujú vyššiu pevnosť. Jeho merná hmotnosť sa pohybuje od 0,85 do 0,90 g/cm³, polyetylén je teda ľahší ako voda. Je bez chuti a zápachu a fyziologicky neškodný (Obr. 1).

Polyetylény sú typickými plastami, ktorých vlastnosti mimoriadne závisia od štruktúry. Štruktúrna závislosť vlastností je preto základným parametrom na rozlíšenie jednotlivých druhov polyetylénov a odvíjajú sa od nej aj ich názvy. [3]



Obr. 1 Štruktúrny vzorec PE

Tab. 1 Rozdelenie jednotlivých druhov polyetylénov

Skratka	Názov
PE-LD	nízkohustotný (rozvetvený, vysokotlakový) polyetylén
PE-HD	vysokohustotný (lineárny, nízkotlakový) polyetylén
PE-MD	strednohustotný polyetylén
PE-LLD	lineárny nízkohustotný polyetylén
PE-VLD	veľmi nízkohustotný polyetylén
MPE-LLD	metallocenový lineárny nízkohustotný polyetylén
PE-UHMW	ultravysokomolekulový polyetylén
PE-X	zosieťovaný polyetylén

2.2 Rozdelenie polyetylénov

Vlastnosti polyetylénu závisia od molekulovej hmotnosti, priestorového usporiadania mérov v reťazci makromolekuly a stupňa kryštalinity.

Polyetylén s nízkou hustotou PE-LD (z anglického low density) má hustotu v rozmedzí 0,85 - 0,93 g/cm³. Dôvodom nízkej hustoty je veľký počet dlhších bočných CH₃ skupín v reťazci. Vysoká rozvetvenosť bráni tesnému usporiadaniu makromolekúl, preto sa PE-LD vyznačuje nízkym obsahom kryštalitov, 40 - 50 %.

Polyetylén PE-HD (z angl. high density) má hustotu v rozmedzí 0,945 - 0,965 g/cm³. Dôvodom vysokej hustoty je nerozvetvený lineárny reťazec, ktorý umožňuje vznik väčšieho množstva kryštalitov, a to 60 - 80 %.

S použitím katalyzátorov kovov prechodného mocenstva (chróm, molybdén) sa vyrába vysokohustotný polyetylén PE-HD s hustotou v rozmedzí 0,95 - 0,97 g/cm³. Obsahuje vysoké množstvo kryštalitov až do 85 %.

S použitím rôznych katalyzátorov a iniciátorov sa vyrába lineárny polyetylén s nízkou hustotou, PE-LLD (z anglického linear low density). Je to kopolymér PE a vyššieho α -olefínu. Jeho hustota je porovnateľná s PE - LD.

Pomocou Zieglerovej metódy sa vyrába aj polyetylén s veľmi vysokou molekulovou hmotnosťou PE-UHMW.

Nizkotlakovou polymerizáciou s použitím nových katalyzátorov, metallocénov sa vyrábajú metallocénové polyetylény MPE-LLD. Od obvyklých PE-LLD sa líšia užšou distribučnou krivkou molekulových hmotností.

PE-VLD je polyetylén s veľmi nízkou hustotou, medzi 0,880 až 0,910 g/cm³. Tieto ultraľahké typy sú kopolyméry alebo terpolyméry etylénu až s 10 % vyšších α -olefinov, ako oktén, tetrametylpentén, spolu s propylénom.

Molekulová hmotnosť špeciálneho ultravysokomolekulového polyetylénu PE-UHMW (ultra-high-molecular-weight) je v rozmedzí 1-2,5 miliónov.

PE-X je zosieťovaný polyetylén. Zosieťovanie sa uskutočňuje počas spracovania vplyvom sieťovacích prísad. [3]

2.3 HDPE vysokohustotný polyetylén

HDPE je definovaný minimálnou mernou hmotnosťou 941 kg/m³. HDPE je charakteristický veľmi nízkym obsahom rozvetvených polymérnych reťazcov, čo je dosahované použitím špeciálnych (napr. Ziegler-Natta) katalyzátorov. Polymerizácia prebieha dostatočne rýchlo už pri teplote 100°C a miernom tlaku. Preto sa produkt označuje tiež ako nízkotlaký PE. Nízky obsah rozvetvených polymérnych reťazcov umožňuje intenzívne pôsobenie intermolekulových síl pozdĺž reťazcov, čo má za následok lepšie fyzikálno-mechanické vlastnosti napr. v porovnaní s LDPE. Vzniká však príliš tvrdý a ťažko spracovateľný polymér, z ktorého sa ale dá vyrobiť vlákno, ktoré je 10 krát pevnejšie ako oceľ. Lepšie spracovateľný HDPE sa získa polymerizáciou etylénu s prídavkom cca 4 % 1-buténu, čo spôsobuje, že polymérny reťazec obsahuje viac krátkych bočných reťazcov, čím tvrdosť výsledného produktu klesá a zlepšuje sa spracovateľnosť.

2.3.1 Vlastnosti HDPE

Hustota HDPE sa pohybuje v rozmedzí od 0,93 do 0,97 g/cm³. Hustota HDPE je nepatrne vyššia než LDPE. V porovnaní s LDPE vykazuje HDPE menšie vetvenie, čo má za následok silnejšiu medzimolekulárnu energiu, ktorá zaisťuje väčšiu pevnosť v ťahu. HDPE je tuhšia než LDPE, je odolný voči kyselinám, rastlinným olejom, alkoholu a dlhodobému zahrievaniu do cca. 110 °C. Je takmer nezničiteľný, má vynikajúcu húževnatosť, odolnosť proti oteru, pevnosť v ťahu a jeho opotrebenie je minimálne. HDPE disponuje výhodou jednoduchého rezania, je vhodný pre spracovanie bezo hoblín, výborne sa opracováva a má samomazacia schopnosť. HDPE veľmi dobre izoluje a ponecháva si svoje vlastnosti aj pri veľmi nízkych teplotách.

2.4 LDPE nízkohustotný polyetylén

LDPE je najstarším - najdlhšie vyrábaným druhom polyetylénu. Používa sa predovšetkým na výrobu fólií. Vyrába sa radikálovou polymerizáciou pri teplote asi 200°C a vysokom tlaku 100-260 MPa. Býva označovaný aj ako vysokotlaký PE. Má relatívne nižšiu mernú hmotnosť (pod 941 kg/m³), lebo vnútorná štruktúra - bočné reťazce - nedovoľujú kompaktné usporiadanie makromolekúl.

2.4.1 Vlastnosti LDPE

K výhodným vlastnostiam plastov z polyetylénu patrí ich tvrdosť, vysoká pevnosť v ťahu a veľmi dobrá odolnosť proti vlhkosti. Jedným obzvlášť dôležitým charakteristickým rysom polyetylénu, ak ho použijeme ako obalový materiál, je jednoduchosť jeho zvarovania spôsobená relatívne nízkym rozsahom bodu topenia. Avšak odolnosť proti kyslíku a organickým látkam je len mierna.

Vlastnosti polyetylénu sa líšia v závislosti na základných parametroch hustoty, kryštálmi, rozdelenie molekúl a molekulovej hmotnosti. Napríklad medza ťahu a pevnosti pri ohýbaní sa zvyšuje s hustotou. Avšak priehľadnosť sa celkovo zlepšuje s klesajúcou hustotou. Kým HDPE plastové fólie sú nepriehľadné a na dotyk krehké, LDPE plastové fólie sú väčšinou mäkké a pomerne priehľadné. Čím nižšia je kryštalinity a tým aj hustota, tým voľnejší a pružnejší materiál je. LDPE produkt s hustotou 0,918 g/cm³ vykazuje lepšiu odolnosť proti pnutiu, v závislosti na okolitom prostredí, ako produkt s hustotou 0,930 g/cm³. Hustota a jednoduché ťahanie sú závislé predovšetkým na množstve použitého tlaku pri výrobe. Pri použití vysokého tlaku, dostaneme polyetylén s nízkou hustotou. V porovnaní s HDPE je štruktúra LDPE, pokiaľ ide o hmotnosť, ľahšia a voľnejšia. Keď ho stlačíte, vráti sa späť do pôvodnej podoby.

2.5 Porovnanie vlastností typov polyetylénu

Základné výhodné vlastnosti polyetylénu sú:

- nízka hustota v porovnaní s ostatnými plastmi
- vysoká rázová húževnatosť a vysoká ťažnosť
- veľmi dobré elektroizolačné a dielektrické vlastnosti, pre ktoré sa používa v káblovom priemysle
- veľmi malá nasiakavosť
- vysoká korózna odolnosť proti chemickým činidlám.

Chemická odolnosť polyetylénu je výborná, odoláva vode, roztokom solí, zásad a kyselín. Napadajú ho len silné oxidačné zlúčeniny (koncentrovaná kyselina dusičná, kyselina sírová, kyselina chromsírová, kyselina chlorsulfónová a halogény). Polyetylén možno účinne

stabilizovať proti UV degradácii. Účinným prostriedkom je prídavok už 2 % sadzí, veľmi účinné sú stabilizátory HALS, zlepšujú až šesťkrát odolnosť proti ultrafialovému žiareniu. Do 60°C je polyetylén nerozpustný vo všetkých organických rozpúšťadlách. Len v aromatických a alifatických uhľovodíkoch a v ich chlórovaných derivátoch napučiava, čo viac platí pre PE-LD ako pre PE-HD. Čím je kryštalinita vyššia, tým menej polyetylén napučiava. Boli vyvinuté niektoré špeciálne typy PE-HD odolávajúce tiež pohonným hmotám a varným olejom, ktoré možno používať na palivové nádrže v automobilovom priemysle. Polyetylén má nízku priepustnosť pre vodnú paru, kyslík, oxid uhličitý a niektoré aromatické zlúčeniny.

Látky, ako sú saponáty, znižujú povrchové napätie a nazývame ich tenzoaktívne. Výsledkom ich povrchovej aktivity je korózia za napätia, na ktorú je PE náchylný. Možno jej zabrániť používaním polyetylénu so strednou hustotou okolo 0,94 g/cm (PE-MD) a vyššou molekulovou hmotnosťou, používaním kopolyméru E/VAC s nízkym obsahom vinylacetátu, ale najmä použitím lineárnych nízkohustotných polyetylénov PE-LLD. Tie majú zo všetkých polyetylénov najvyššiu koróznou odolnosť, ktorá vzrastá s molekulovou hmotnosťou. [3]

Tab. 2 Vybrané vlastnosti polymérov

Vlastnosť	Jednotka	PE-LD	PE-HD	PE-UHMW
<i>Fyzikálne</i>				
Hustota	g/cm ³	0,85-0,93	0,94-0,97	0,935
Index toku taveniny (190/2, 16)	g/10 min	0,1-70	0,4-8	-
Teplota tavenia kryštálov	°C	105-110	130-135	135-138
<i>Mechanické vlastnosti</i>				
Modul pružnosti v ťahu 23°C	MPa	100-500	700-1400	300
Modul pružnosti v ťahu 50°C	MPa	30-100	400-900	150
Modul pružnosti v ťahu 100°C	MPa	pod 10	80-200	-
Pevnosť 23°C	MPa	8-23	18-35	nad 20
Pevnosť 80°C	MPa	2	4-6	8
Ťažnosť	%	cca 600	400-1500	350
Tvrdosť guľôčkou, 30 s	MPa	15	50	38
Rázová húževnosť Charpy, 20°C	kJ/m ²	bez lomu	bez lomu	bez lomu
Vrubová húževnosť Charpy, 20°C	kJ/m ²	bez lomu	bez lomu	bez lomu
<i>Tepelné vlastnosti</i>				
Vicat B	°C	do 40	70-75	74
Koeficient dĺžkovej teplotnej roz-	K ⁻¹	2,5.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴
Teplota použitia, maximálna krátk.	°C	80-90	90-120	-
Teplota použitia, maximálna trvalá	°C	60-75	70-80	-
Teplota použitia, minimálna trvalá	°C	-50	-50	-

Vyšší obsah kryštalického podielu zvyšuje pevnosť, tuhosť a tvrdosť. Ťažnosť a húževnosť so vzrastajúcim obsahom kryštálov klesá, odolnosť voči chemikáliám sa zlepšuje a priepustnosť pre plyny a pary klesá. Naopak zvyšuje sa zákal. Množstvo kryštálov výrazne neovplyvňuje viskozitu taveniny. Polyetylény s užšou distribúciou molekulovej hmotnosti majú lepšie mechanické vlastnosti, tepelnú tvarovú stálosť a chemickú odolnosť. Spracovateľnosť majú lepšiu polyetylény so širokou distribúciou molekulových hmotností. Tieto typy sú vhodnejšie na vyfukovanie.

Ultravysokomolekulový polyetylén je vďaka svojej extrémne vysokej molekulovej hmotnosti vysoko húževnatý v širokom rozmedzí teplôt, nepodlieha korózii za napätia a má predovšetkým vynikajúce klzné a oteruvzdorné vlastnosti.

Polyetylén s nízkou molekulovou hmotnosťou (do 100 000) má nižšiu kryštalinitu, lepšie zateká a lepšie sa spracováva. Jeho mechanické vlastnosti (pevnosť, tuhosť, húževnatosť) sú horšie, rovnako ako tvarová stálosť za tepla a chemická odolnosť.

V horúcej vode bez zaťaženia sa výrobky z polyetylénu nedeformujú, PE-HD a PE-LLD sú stále i za varu. [3]

2.6 Spracovanie a použitie typov polyetylénov

Na vstrekovanie sa používajú typy s vyšším indexom toku taveniny, väčšinou od 2 do 70 g/10 min (190°C, 2,16 kg). Často sa používa PE-LD s indexom toku okolo 20 g/10min. Typy s nízkou viskozitou resp. vysokým tavným indexom a dobrou zatekavosťou sa používajú na masovú výrobu drobných predmetov i zložitého tvaru s dobrým povrchovým leskom. Vynikajúci povrchový lesk sa dosiahne použitím PE-LLD typov. Typy so stredným indexom toku (5 až 15) majú vyššiu pevnosť, nižšiu náchylnosť na koróziu za napätia a sú určené aj na náročnejšie technické aplikácie. Typy s nízkou tekutosťou (asi 2 g/10 min) majú najvyššie hodnoty mechanickej pevnosti a lepšie odolávajú korózii za napätia.

Na vyfukovanie dutých nádob sa používajú polyetylény s nižšími indexmi toku taveniny (0,2 až 2 g/10 min), lebo parizon vytlačený v prvej fáze sa nesmie pretrhnúť vlastnou tiažou. Na vyfukovanie sa podľa aplikácie používa PE-LD aj PE-HD. Nízkohustotný PE-LD je vhodný na mäkké nádoby, fľaše a kanistre do objemu 60 litrov. Vysokohustotné typy PE-HD sú na vyfukovanie bežnejšie. Vhodnou voľbou materiálu sa dajú vyrábať aj benzínové kanistre, automobilové nádrže pohonných hmôt a sudy až do objemu 200 litrov. Vyfukovaním sa z PE-HD vyrábajú aj veľkorozmerné hračky a športové náradie, fľaše na mlieko, kozmetické obaly a veľkoobjemové zásobníky až do objemu 1000 litrov. PE-LLD nie je na vyfukovanie veľmi vhodný, pretože má príliš úzku distribúciu mólových hmotností. Veľkoobjemové nádoby sa z neho vyrábajú prevažne technológiou rotačného odlievania.

Častou technológiou spracovania PE je vytlačanie. Vyrábajú sa tak potrubia na studenú vodu a plyn, kde sa používajú špeciálne vysokomol. typy s indexom toku 0,1-0,5g/10 min, stabilizované sadzami (čierny polyetylén). Potrubia z PE-HD sa používajú predovšetkým pri rozvodoch vody a plynu. Popri štandardných typoch bol v posledných rokoch vyvinutý PE100, ide o kopolymér s bimodálnou distribučnou krivkou. Používanie PE- LD na výrobu rúr je na ústupe a udržalo sa len v zavlažovacích poľnohospodárskych systémoch. [3]

Hranica hrúbky stien rúr vyrábaných vytlačovaním je technologicky obmedzená na cca 60 mm. Najväčší výrobitelný priemer rúry na tlak 10 barov je 630 mm. Z materiálu PE 100 možno vyrobiť rúru na rovnaký tlak s maximálnou hrúbkou steny 60 mm aj s priemerom 1000 mm. To má veľký význam pre stavbu veľkokapacitných rozvodov a kanalizačných sietí. Extrúziou sa vyrábajú PE rúry do priemeru 1 600 mm, avšak vzhľadom na hrúbku steny obmedzenej na 60 mm len na tlak nižší ako 10 barov.

Ďalšou dôležitou okolnosťou je značne zvýšená odolnosť materiálov PE 100 voči vzniku a šíreniu napät'ových trhlin, ktoré sú slabou stránkou bežných typov PE-HD.

Vytlačovacie typy polyetylénu sa používajú ako elektroizolačné materiály v káblovom priemysle. Sú to hlavne nízko až strednohustotné typy (0,918 až 0,930 g/cm³) s indexom toku 0,15 až 0,35 g/10 min, ktoré sú vhodné na výrobu telekomunikačných káblov. Bežne sa používajú aj izolácie z penového polyetylénu, ktorý vzniká počas vytlačania. Izolačné hmoty z PVC na káble vysokého napätia (až do 225 kV) sa dnes nahrádzajú zosieťovanými typmi polyetylénu. [3]

Vybrané typy vysokomolekulárneho PE-HD s vysokou húževnatosťou majú dlhodobú trvanlivosť a používajú sa na výrobu skládkových izolačných fólií. Širokoštrbinovými hlavami sa vytlačajú dosky používané ako polotovar na tepelné tvarovanie.

Väčšina fólií sa vyrába z nízko-hustotného PE-LD. Obvykle sa volia húževnaté a pevné typy s hustotou 0,918 g/cm a indexmi toku od 0,2 do 0,7 g/10 min., pre lepšiu priehľadnosť je treba vybrať typ s indexom toku medzi 1,5 až 2 g/10 min. Dnes možno i pri vysokom výkone vyfukovacích strojov vyrobiť veľmi tenké, priehľadné a pritom pevné fólie. Na výrobu zvlášť tenkých fólií (až 5 μ m) sa používa PE-LLD. Na zmrašťovacie fólie nie je tento typ polyetylénu veľmi vhodný. [3]

Ultravysokomolekulový polyetylén PE-UHMW vyžaduje vďaka svojej vysokej molekulovej hmotnosti zvláštne postupy pri spracovaní. Jednoduché tvary sa zhotovujú lisovaním

pri zvýšenej teplote a nasledujúcim pomalým ochladzovaním. Ďalšie spracovanie je možné pomocou trieskového obrábania. Ak je treba vyrobiť väčší počet kusov, použije sa vstrekovanie na špeciálnych strojoch s dĺžkou závitovky 15 až 20 D. Touto technológiou sa vyrábajú lôžka ako súčasť implantátov bedrových a kolenových kĺbov. Na obr. 2 sú príklady výliskov z PE. Uvedené výrobky sú výlisky aj s vtokovou sústavou, ktoré boli vstrekované do osemduťinovej združenej formy. [3]



Obr. 2 Technické PE výlisky pre strojársky a elektro-technický priemysel

3 PLNIVÁ

Vo funkcii časticových plnív sa používajú celá škála prírodných a syntetických, anorganických a organických materiálov.

Disperzné plnivá majú rozdielne chemické zloženie, tvar, hustotu, farbu, tvrdosť, merný povrch a mnohé iné fyzikálne charakteristiky.

Podľa účinku na vlastnosti kaučukovej zmesi sa plnivá najčastejšie delia na:

- Stuzujúce plniva – ktoré obvykle zvyšujú pevnosť v ťahu, štruktúrnu pevnosť a odolnosť proti oderu (napr. jemné sadze a zrážané silika – veľkosť častíc cca 0,01 až 0,1 μm).
- Polostuzujúce plniva, ktorá obvykle zvyšujú pevnosť v ťahu a štruktúrnu pevnosť, ale nie odolnosť proti oderu (napr. tvrdý kaolín, hrubé sadze a zrážaný CaCO_3 – veľkosť častíc cca 0,1 až 1 μm).
- Nestuzujúce plniva, ktoré vlastnosti vulkanizátorov nezlepšujú (napr. mäkký kaolín, CaCO_3 , mastenec – veľkosť častíc cca 1 až 10 μm). [4]

3.1 Chemické zloženie časticových plnív

Vo funkcii anorganických plnív sa používajú uhličitany, sírany, oxidy, hydroxidy a iné zlúčeniny.

Z hľadiska tvaru sa časticové plnivá rozdeľujú na pravidelné (izotrópne) a nepravidelné (anizotrópne). Z pravidelných sú najznámejšie sférické (napr. uhličitán vápenatý, dolomit). Anizotrópný tvar častíc majú doštičkovité (mastenec, sľuda, kaolín, hydroxid horečnatý) a vláknité (wollastonit) prírodné anorganické plnivá. [4]

3.2 Hustota

Hustota prírodných organických plnív je blízka hustote polymérnych matric, a preto sa hustota kompozitov len málo líši od hustoty pôvodnej polymérnej matrice. V prípade anorganických plnív, hustota ktorých je v porovnaní s hustotou polymérnych matric viac ako dvojnásobne vyššia, je nevyhnutné uvádzať nielen celkovú hustotu kompozitov, ale aj zloženie kompozitov v objemových, resp. hmotnostných percentách.

Prírodný uhličitan vápenatý bol použitý na prípravu PVC kompozitov už v 60 rokoch XX. storočia. Spotreba CaCO_3 predstavuje v súčasnosti takmer 80 % svetovej spotreby disperzných anorganických plnív, z toho väčšinu (cca 70 %) tvorí prírodný CaCO_3 . Väčšina (cca 80 %) sa používa na prípravu kompozitov na báze PVC. Zostávajúcich 20 % CaCO_3 sa používa na prípravu PE, PP, PA a ABS kompozitov.

Spomedzi organických časticových plnív sú najrozšírenejšie drevné častice.

V závislosti od požadovanej veľkosti a tvaru častíc sa drevné častice používajú vo forme múčky, pilín, hoblín, rozvláknených štiepok a iných. [4]

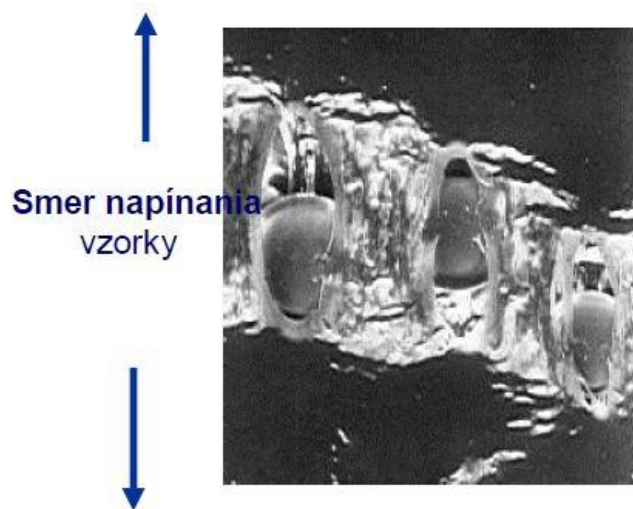
3.3 Vlastnosti časticových kompozitov

Vlastnosti časticových polymérnych kompozitov sú podmienené mnohými faktormi ako z hľadiska plniva tak i polymérnej matrice. Medzi najvýznamnejšie patria:

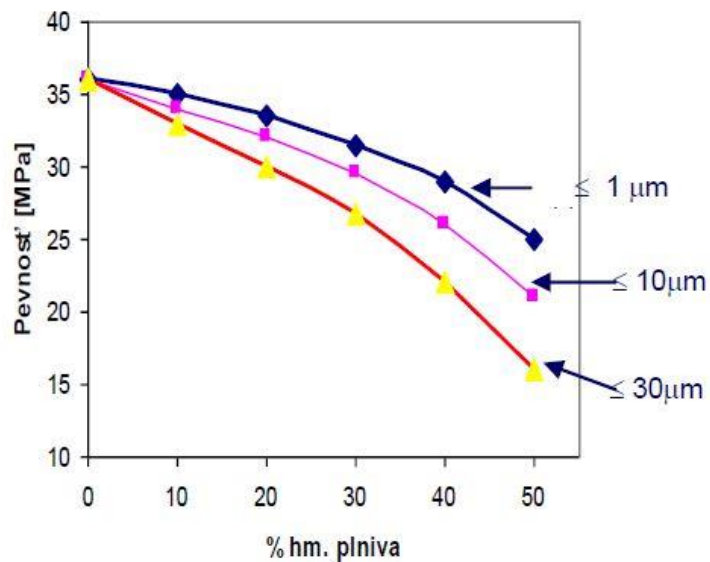
Faktory ovplyvňujúce vlastnosti časticových kompozitov:

- Fyzikálne a chemické charakteristiky plniva (veľkosť a distribúcia veľkosti častíc, tvar častíc, chemické zloženie, obsah prímiesí, modifikácia plniva, spôsob prípravy plniva) a matrice (chemické zloženie, nadmolekulárna štruktúra, tokové vlastnosti). Obsah plniva v kompozite, spôsob prípravy.
- Interakcie na medzifázovom rozhraní plnivo/plnivo (aglomerácia, deštrukcia plniva). Interakcie na medzifázovom rozhraní polymér/plnivo.
- Všeobecne možno vyjadriť vplyv plnív na mechanické vlastnosti takto:
- Pridaním anorganických plnív sa dosiahne významné zvýšenie tuhosti (modulu pružnosti) pri súčasnom poklese ťažnosti.
- V prípade použitia plnív s anizotropným (doštičkovitý, vláknitý) tvarom plniva je možné dosiahnuť zlepšenie pevnosti, ktoré závisí od aspektívneho pomeru, obsahu plniva a jeho orientácie (Obr. 3).
- Pri použití plnív s izotropným (sférickým) tvarom častíc (CaCO_3 , sklenené guľôčky) so stúpajúcim obsahom plniva klesá pevnosť, intenzita poklesu závisí od veľkosti častíc, najmenší pokles je pri optimálnej veľkosti častíc plniva (1-10 μm). Pri máhaní kompozitu sférické plnivá pôsobia v polymérnej matrici ako koncentrátoři napätia a iniciujú deštrukciu kompozitu.

Keďže plnivá majú spravidla vyššiu tvrdosť ako polyméry, so zvyšujúcim sa obsahom plniva sa zvyšuje aj celková tvrdosť kompozitov. Súčasne sa zlepšuje aj tepelná vodivosť, odolnosť voči horeniu, rozmerová stabilita, absorpcia UV žiarenia a rontgenového žiarenia a mnohé ďalšie vlastnosti (Obr. 4). [4]



Obr. 3 Deštrukcia kompozitov so sférickými časticami



Obr. 4 Vplyv veľkosti častíc plniva na pevnosť PP kompozitov

3.3.1 Vplyv tvaru častíc plniva

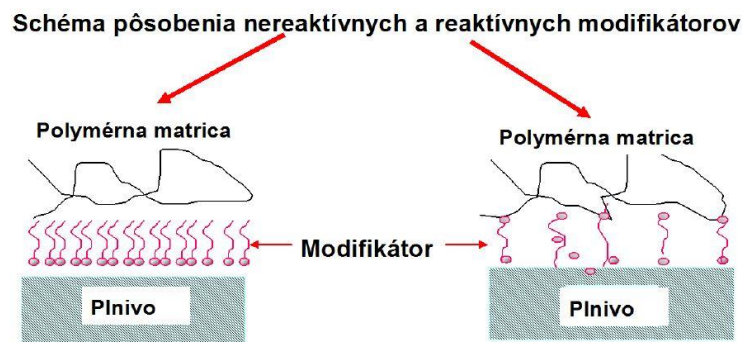
Stužujúci účinok plniva je zrejmy v prípade vláknitých (wolastonit) a doštičkových (sľuda) plnív, zatiaľ čo sférické plnivá (uhličitan vápenatý) iniciujú pokles pevnosti.

Pokles mechanických vlastností je kritický najmä pre také typy kompozitov, pri ktorých je vysoký obsah plniva nevyhnutnou podmienkou na dosiahnutie požadovaných vlastností. Napríklad na prípravu nehorľavých kompozitov je potrebných až 60 % hm. hydroxidu horčnatého, resp. hlinitého. Optimalizácia vlastností kompozitných materiálov preto musí obsahovať všetky aspekty počínajúc fyzikálno-mechanickými vlastnosťami, cez štruktúru kompozitov až po interakcie na medzifázovom rozhraní. Zatiaľ čo interakcie plnivo/plnivo je možné pomerne úspešne regulovať optimalizáciou veľkosti častíc a obsahom plniva v polymérnej matrici, optimalizácia interakcií polymér/plnivo je podstatne náročnejšia. Vplyv veľkosti častíc plniva je so zvyšujúcim sa obsahom plniva výraznejší. [4]

3.4 Fyzikálna a chemická modifikácia disperzných kompozitných materiálov

Výrazné zlepšenie vlastností časticových kompozitov je možné dosiahnuť modifikáciou plniva a matrice. V súčasnosti je komerčne dostupná celá škála modifikátorov počínajúc od najlacnejších vyšších mastných kyselín, ich esterov a solí a končiac širokým výberom organických väzbových prostriedkov, predovšetkým silánov a titanátov. Výber vhodných typov modifikátorov je podmienený mnohými faktormi. Z hľadiska plniva je to predovšetkým veľkosť a tvar častíc, špecifický povrch, chemické zloženie, kryštalická štruktúra a obsah prímiesí. Z hľadiska polyméru je primárne chemické zloženie, molekulová hmotnosť (viskozita) a prítomnosť reaktívnych skupín schopných reagovať s povrchom plniva.

V závislosti od charakteru pôsobenia sa modifikátory rozdeľujú na nereaktívne a reaktívne. Zatiaľ čo úlohou nereaktívnych modifikátorov je zlepšiť predovšetkým tokové vlastnosti a dispergáciu plniva v polymérnej matrici, prostredníctvom reaktívnych modifikátorov sa dosiahne zlepšenie mechanických vlastností kompozitov (Obr. 5). [5]



Obr. 5 Reaktívne a nereaktívne modifikátory

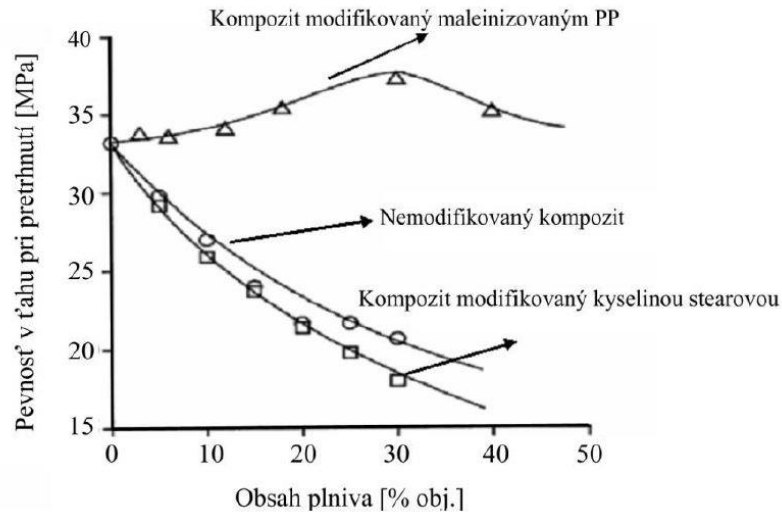
Okrem požiadaviek na výsledné vlastnosti je výber modifikátora závislý od obsahu plniva v kompozite. Aplikácia nereaktívnych modifikátorov je nevyhnutná v kompozitoch s extrémne vysokou viskozitou, t. j. kompozitoch s vysokým obsahom plniva, pri ktorých sú interakcie plnivo/plnivo veľmi silné.

Nereaktívne modifikátory nereagujú s povrchom plniva ani s matricou, ich úlohou je znížiť adsorpciu vlhkosti a zabrániť aglomerácii počas uskladňovania a výroby kompozitov. Použitím nereaktívnych modifikátorov sa zabráni vzájomným interakciám medzi plnivami, čím sa okrem zníženia viskozity dosiahne lepšia dispergácia plniva v matrici a zabráni sa jeho aglomerácii. Napríklad v prípade kompozitov, kde je vysoký obsah plniva nevyhnutný na dosiahnutie požadovaných vlastností, by sa bez modifikácie podstatne zhoršili (až o 50 %) nielen mechanické vlastnosti, ale aj tokové (viskozita až o 1 -2 poriadky) vlastnosti.

Účinnosť nereaktívnych modifikátorov, označovaných aj ako lubrikanty, resp. klzné činidlá, závisí od ich obsahu v kompozite. Maximálne zníženie viskozity sa dosiahne v prípade, kedy modifikátor vytvára na povrchu plniva monomolekulovú vrstvu. Ďalšie zvýšenie obsahu modifikátora už nevedie k zlepšeniu tokových vlastností. Modifikátor sa dostáva do objemu polymérnej matrice (Obr. 6) a spôsobuje zhoršenie mechanických vlastností a tepelnej stability polymérnej matrice. Prírodné aj syntetické komerčné plnivá (zrážaný uhlíčitán vápenatý, hydroxid horečnatý, hydroxid hlinitý) sa modifikujú priamo vo výrobe.

Ako už z názvu vyplýva, reaktívne modifikátory reagujú prostredníctvom vytvorenia chemickej väzby s povrchom plniva a tiež s polymérnou matricou. Premostenie prostredníctvom modifikácie maleinizovaným PP sa prejaví na zlepšení mechanických vlastností v širokom koncentračnom rozsahu plniva nielen v porovnaní s nemodifikovanými kompozitmi, ale aj s pôvodnou polymérnou matricou. Pevnosť väzby medzi polymérom a plni-

vom môže byť vyššia ako pevnosť samotnej polymérnej matrice. V tomto prípade dochádza k rozrušeniu kompozitov v objeme polymérnej matrice častice nepôsobia ako koncentrátoři napätia a neiniciujú deštrukciu kompozitu pri namáhaní tak ako je to v prípade nemodifikovaných kompozitov. [6]



Obr. 6 Vplyv typu modifikátora na vlastnosti PP kompozitov

3.5 Nanoplňivá

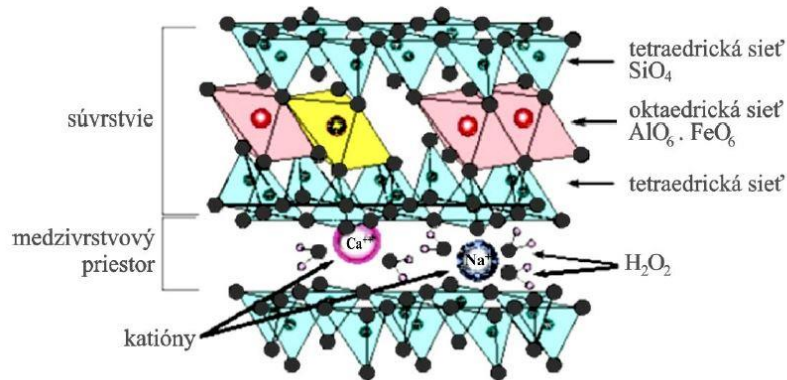
Vo funkcii plnív pre polymérne nanokompozity sa používa celý rad prírodných a syntetických materiálov. Z hľadiska tvaru sa nanoplňivá delia na:

- vrstevnaté - prírodné minerály (montmorillonit, mastenec, hektorit, vermiikulit, kaolinit, magadit).
- vláknité - syntetické (uhlíkové nanorúrky), prírodné (halloyzit)
- sférické - nanoštruktúrne kovy (Ag, Al, Ca, Fe, Li, Mg, Ga, Sr) a oxidy kovov (Al_2O_3 , TiO_2).

Analógia medzi tvarom častíc mikro a nanoplňív je však iba zdanlivá. Okrem rozmerov sa mikro a nanokompozity líšia v mnohých ďalších parametroch.

3.5.1 Vrstevnaté silikáty

Vrstevnaté minerály sa vyskytujú v podobe extrémne jemných kryštálov. Ich základnú štruktúrnú jednotku tvoria súvrstvia (dvojsieťové, trojsieťové). Z hľadiska priemyselného využitia je zo skupiny vrstevnatých silikátov najvýznamnejší montmorillonit (Obr. 7). [7]



Obr. 7 Schéma štruktúry montmorillonitu

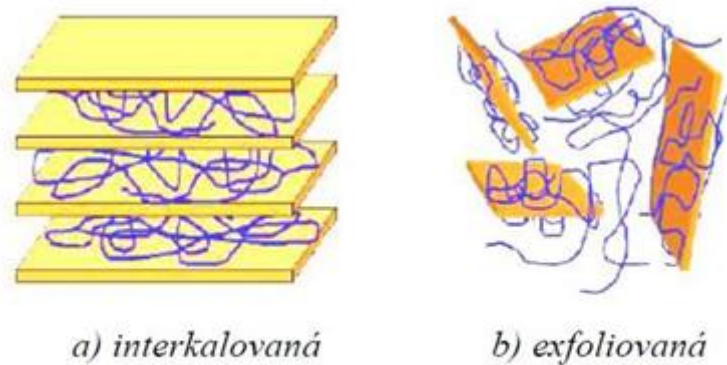
Štruktúra montmorillonitu je tvorená z dvoch súvislých sietí tetraédrov s centrálnymi kremíkovými atómami, medzi ktorými je uložená jedna oktaedrická sieť s centrálnymi atómami hliníka.

Mimoriadny záujem o montmorillonit vyplýva zo skutočnosti, že má, rovnako ako iné typy vrstevnatých silikátov, schopnosť expandovať a prijímať do svojej štruktúry veľké organické molekuly prostredníctvom iónových reakcií. Okrem zvýšenia veľkosti medzi-rovinných priestorov (z pôvodných cca 1,6 nm na 2,5 - 4,0 nm) sa zmení charakter povrchu plniva z hydrofilného na hydrofóbny (organofilný). Vo funkcii modifikátorov sa používajú terciárne a kvartérne alkylamíny s vysokým počtom uhlíkov (> 16), ale aj aminokyseliny, imidazoly, organické silány a ďalšie zlúčeniny. Keďže počas kationovo výmenných reakcií dochádza k interkalácii (angl. intercalate = vsúvanie, vloženie) alkylamínov do medzi-rovinných priestorov vrstevnatých silikátov, expandovaná štruktúra minerálov sa označuje ako interkalovaná a plnivá organofilné (angl. organoclay).

Interkalované nanokompozity sú nanokompozity obsahujúce plnivo, vzdialenosť medzi jednotlivými súvrstviami ktorého je 2- až 3-násobne vyššia v porovnaní s pôvodnou štruktúrou minerálov, avšak jednotlivé súvrstvia nie sú vzájomne oddelené.

Exfoliované nanokompozity majú jednotlivé individuálne vrstvy vzájomne oddelené.

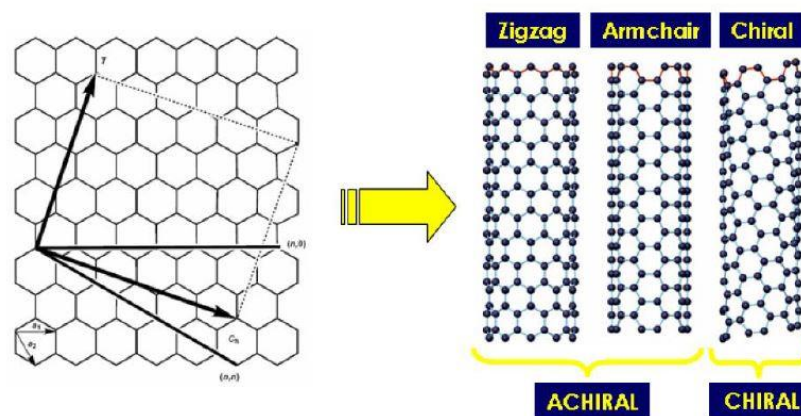
Príprava interkalovanej štruktúry je v procese prípravy polymérnych nanokompozitov potrebná, ale na dosiahnutie výrazného zlepšenia vlastností nepostačujúca. Najdôležitejším krokom je dosiahnutie úplného oddelenia (angl. exfoliate) individuálnych vrstiev a ich rovnomerná dispergácia v objeme polymérnej matrice. Ako exfoliované nanokompozity sa preto označujú polyméry, ktoré obsahujú exfoliované plnivo (Obr. 8). [7]



Obr. 8 Štruktúra vrstevnatých silikátov

3.5.2 Uhlíkové nanorúrky

Uhlíkové nanorúrky (označované ako CNT - Carbon NanoTubes) boli po prvýkrát pripravené v roku 1991 Japoncom Sumiom Iijimom. Steny nanorúrok sú vytvorené rolovaním šesťuholníkovej grafénovej vrstvy pozostávajúcej z atómov uhlíka V závislosti od spôsobu zrolovania je možné pripraviť uhlíkové nanorúrky s tzv. chirálnou, zigzag a armchair štruktúrou (Obr. 9). [8]



Obr. 9 Schéma štruktúry grafénových vrstiev a jednostenných uhlíkových nanorúrok

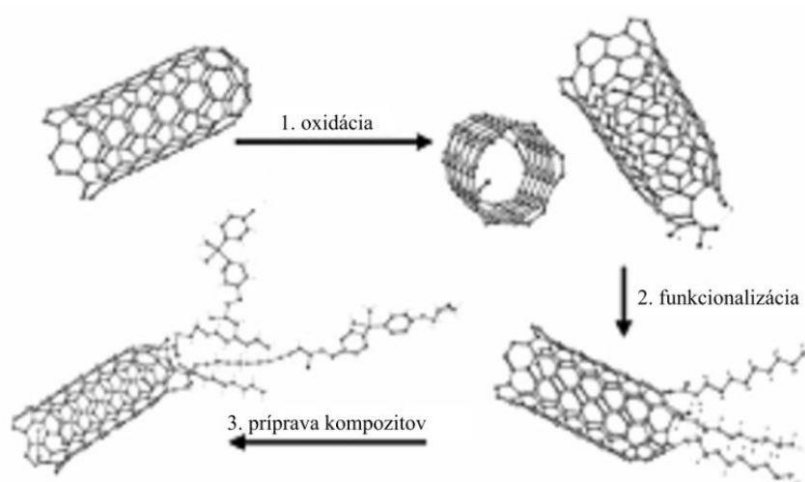
V závislosti od spôsobu výroby môžu mať uhlíkové nanorúrky jednu, alebo viac stien. Jednostenné nanorúrky sú vytvorené z jednej zrolovanej grafénovej vrstvy, mnohostenné nanorúrky (MWNT) pozostávajú z početných sústredných súosových grafénových valcov navzájom zasunutých do seba.

Jednostenné uhlíkové nanorúrky (SWNT - single-walled nanotubes) majú rozdielnu nielen štruktúru, ale aj vlastnosti v porovnaní s viacstennými uhlíkovými nanorúrkami (MWNT - multi-walled nanotubes). [7]

Funkcionalizácia uhlíkových nanorúrok

Najväčší technologický problém pri príprave polymérnych nanokompozitov predstavuje veľmi zlá zmáčateľnosť uhlíkových nanorúrok polymérnou maticou. Funkcionalizácia uhlíkových nanorúrok je preto v porovnaní s modifikáciou uhlíkových vlákien podstatne komplikovanejšia a technologicky náročnejšia.

Modifikácia (funkcionalizácia) uhlíkových nanorúrok sa uskutočňuje v disperznom prostredí prostredníctvom zlúčením obsahujúcich funkčné skupiny. Počas funkcionalizácie sa modifikátor adsorbuje na povrch uhlíkových nanorúrok. V optimálnom prípade dôjde k chemickému naviazaniu modifikátora na povrch uhlíkových nanorúrok prostredníctvom slabších Van der Waalsových väzieb, alebo silnejších kovalentných väzieb. Pretože uhlíkové nanorúrky sú zakončené podstatne reaktívnejšími fullerénovými molekulami, k naviazaniu funkčných skupín dochádza prednostne na ich koncoch (Obr. 10). [7]



Obr. 10 Schéma funkcionálizácie uhlíkových nanorúrok

4 KOMPATIBILIZÁTORY

Pre odstránenie nedostatkov alebo zlepšenie spracovateľnosti polymérov sa do ich zmesi pridávajú prísady - aditíva. Podľa požad. efektu delíme prísady na plnivá, zmäkčovadlá, stabilizátory, mazadlá a prísady zvyšujúce tekutosť, retardéry horenia, farbivá a pigmenty, nadúvadla atď. V zmesiach sú obsiahnuté len vo veľmi malých koncentráciách. [9]

Najdôležitejšou prísadou v zmesi tvorenej dvoma alebo viacerými polymermi sú kompatibilizátory. Tie priamo podmieňujú spracovateľnosť takýchto systémov a ich vlastnosti. Z dôvodu hydrofilnosti vrstevnatých silikátov býva ťažké dosiahnuť ich dobré disperzie v systéme, preto sa kompatibilizátory pridávajú aj v týchto prípadoch. Sú to látky zlepšujúce príľnavosť komponentov polyméru a pôvodného alebo organicky modifikovaného ílu. [10]

Základný princíp kompatibilizačného účinku u organicky modifikovaných ílov je založený na slabých a iónových interakciách. Pri kompatibilizácii je časť amfifilickej molekuly hydrofóbná a druhá časť je hydrofilná. Hydrofóbná časť sa fyzikálne púta k polymérnej fáze a hydrofilná časť sa iónovou interakciou viaže k polárnemu povrchu vrstevnatého silikátu so záporným nábojom. [11]

Cieľom kompatibilizácie je získať ustálenú a rovnorodú disperziu, ktorá bude mať požadovanú morfológiu a vlastnosti. Konkrétne zníži povrchové napätie a tým umožní lepšiu dispergáciu, zaisťuje adhéziu medzi fázami a vďaka tomu zlepšuje mechanické vlastnosti výrobku z polymérových zmesí alebo polymérov s plnivami. Zabezpečí, že vzniknutá štruktúra nebude zničená vysokým tlakom a namáhaním počas spracovania. Snižovanie povrchového napätia je vcelku jednoduché na prevedenie, avšak udržaniu štruktúry a zvýšenie adhézie medzi fázami nemožno ľahko dosiahnuť. Preto sa využíva kombinácia niekoľkých kompatibilizátorov, ktoré zabezpečia všetky požiadavky alebo aspoň jeden univerzálny. [12]

Kompatibilizátory pri vhodnej koncentrácii a chemickej štruktúre zlepšujú medzifázovú adhéziu a dispergáciu zložiek a tým umožňujú ľubovoľnej kombinácii východiskových polymérov. Ďalej mení fázovú štruktúru, znižujú medzifázové napätie a tým zlepšujú mechanické vlastnosti polymérov. [12]

II. PRAKTICKÁ ČASŤ

5 STANOVENIE CIEĽOV DIPLOMOVEJ PRÁCE

Cieľom tejto diplomovej práce je zistiť vplyv druhu a koncentrácie kompatibilizátora na vlastnosti plneného HDPE. Ako kompatibilizátor bude použitý malenizovaný polyetylén PRIEX[®] a ako plnivá na plnenie HDPE budú použité modifikovaný íl Cloisite[®] 25A, uhličitan vápenatý CaCO₃ a oxid titaničitý TiO₂. Z jednotlivých materiálov sa pripraví zmesi, z ktorých pomocou vytlačovacieho stroja budú vytlačené struny a z tých budú následne lisované dosičky a skúšobné telieska. Na meraných vzorkách sa budú na skúšobnom stroji merať mechanické vlastnosti a to medza pevnosti v ťahu σ_m , predĺženie pri pretrhnutí ε a modul pružnosti E. Dynamické mechanické vlastnosti budú merané na viacúčelovom meracom zariadení DMA1, kde bude meraná závislosť elastického modulu pružnosti na frekvenciu a závislosť stratového uhla $\tan \delta$ na frekvenciu pri rôznych koncentráciach kompatibilizátora a plnív. Na záver na kapilárnom vytlačovacom plastometri bude meraný index toku taveniny. Výsledky budú štatisticky spracované a vyhodnotené pomocou grafov a tabuliek.

6 POUŽITÉ MATERIÁLY

6.1 Vysokohustotný polyetylén – HDPE

HDPE High-density polyethylene – je druhým najrozšírenejším polymérom používaným v obalovej technike. Vyniká odolnosťou voči vode, alkoholu, ketónom, zriedeným roztokom kyselín a zásad. Má dobré mechanické vlastnosti, je dobre odolný voči vlhkosti. Jeho nevýhodou je však sklon k tzv. korózii – pri výrobe z HDPE vznikajú trhliny.

Tab. 3 Vybrané vlastnosti DOW HDPE 25055 E [13]

Vlastnosť	Hodnota
Hustota	956 kg/m ³
Kryštalinita	75 %
Mechanické	
Modul pružnosti v ťahu	0,911 GPa
Modul pružnosti v ohybe	1,1 GPa
Pevnosť v ťahu	20 MPa
Medza sklzu	25 MPa
Ťažnosť	380 %
Predĺženie na medzi sklzu	10 %
Lomová húževnatosť	1,9 kJ/cm ³
Fyzikálne	
Teplota tavenia	130 °C
Max. prevádzková teplota	85 °C
Teplota spracovania	210 °C
Tepelná vodivosť	0,4 W/m.K
Merné teplo	1,8 – 1,88 kJ/kg.K
Teplota skleného prechodu	-125 až -30 °C
Teplotný súčiniteľ rozťaž-	150.10 ⁻⁶ .K ⁻¹
Horľavosť UL94	HB
Kyslíkový index	19 %
Elektrický odpor	10 ¹⁵ Ω.cm
Prierné napätie	48 MW/m
Dielektrická konštanta	2
Disipačný faktor	0,0002

6.2 Malenizovaný polyetylén - MAPE

Ako kompatibilizátor bol použitý malenizovaný polyetylén PRIEX[®] 12031: Hyperfluid MA-g HDPE. Vyznačuje sa veľmi dobrým štiepením a výrazne nižším dávkovaním oproti iným produktom.

Tab. 4 Vybrané vlastnosti maltenizovaného polyetylénu PRIEX[®] 12031 [14]

Vlastnosť	Hodnota
Štiepenie	0,40 %
Koncentrácia ppm	< 50
MFI (190/5.0)	cca 25

6.3 Modifikovaný íl – Cloisite[®] 25A

Cloisite[®] 25A je v súčasnosti najpoužívanejším komerčným plnivom na báze organicky modifikovaného ílu. Organickými modifikátormi sú kvartélne amóniové soli, ktoré sú iónovo vymenené za sodík, ktorý zohráva úlohu vnútorného kompenzátora nábojovej nerovnováhy. [15]

6.4 Oxid Titaničitý TiO₂

Oxid titaničitý je najbežnejšia zlúčenina titánu. V prírode sa vyskytuje v troch modifikáciách, ako rutil, anatas a brookit, okrem toho je známych ďalších päť vysokotlakových foriem a tri metastabilné.

Tab. 5 Vybrané vlastnosti oxidu titaničitého TiO_2 [16]

Vlastnosť	Hodnota
Hustota	4,23 g/cm ³
Teplota varu	2 972 °C
Teplota topenia	1 843 °C
Molárna hmotnosť	79,866 g/mol

6.5 Uhličitan vápenatý CaCO_3

Je chemická zlúčenina, ktorá sa vyskytuje v prírode ako minerály kalcit a aragonit, alebo ako hlavná súčasť vápenca - usadenej horniny prevažne biologického pôvodu.

Tab. 6 Vybrané vlastnosti uhličitanu vápenatého CaCO_3 [17]

Vlastnosť	Hodnota
Hustota	2,715 g/cm ³
Teplota topenia	1 300 °C
Molárna hmotnosť	100,0869 g/mol

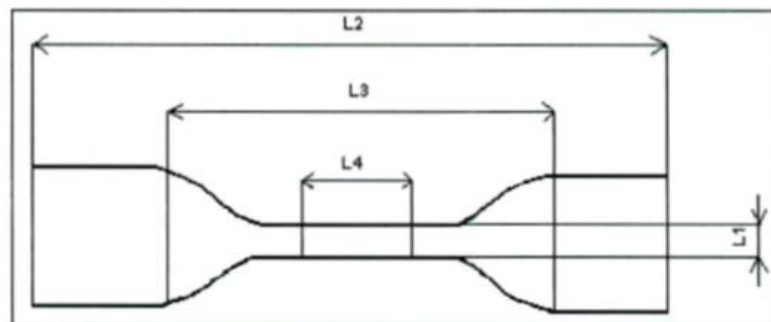
7 PRÍPRAVA SKÚŠOBNÝCH TELIESOK

V laboratóriách FT UTB boli v ručnom vyhrievanom lise lisované doštičky s rozmermi 125x125x2mm. Doštičky boli lisované pri teplote 215°C po dobu 11 min a následne zchladené v hydraulickom lise na 5 min.



Obr. 11 Ručný vyhrievaný lis

Z pripravených vylisovaných doštičiek boli vyseknuté skúšobné telieska podľa ČSN EN ISO 527 – 3 (64 0604) v tvare obojstrannej lopatky typu 5 znázornené na Obr. 12.



Obr. 12 Tvar skúšobného telieska – typ 5 [18]

Rozmery skúšobného telieska:

L1 - šírka zúženej rovnobežnej časti $6 \pm 0,4$ mm

L2 - celková dĺžka 115 mm

L3 - počiatočná vzdialenosť čel'ustí 80 ± 5 mm

L4 - počiatočná merná dĺžka $25 \pm 0,25$ mm

8 POUŽITÉ ZARIADENIA

8.1 Vytlačovací stroj

Pre vytlačovanie struny bol použitý vytlačovací stroj Scientific LE45-30/CV, je to extrúzna jednošneková jednotka pre kontinuálne spracovanie termoplastických materiálov. Zariadenie je prispôsobené aj pre spracovanie korozívnych a abrazívnych materiálov. Výkon je až 60 kg/hod pri vytlačovaní LDPE.

Tab. 7 Technické parametre vytlačovacieho stroja Scientific LE45-30/CV [19]

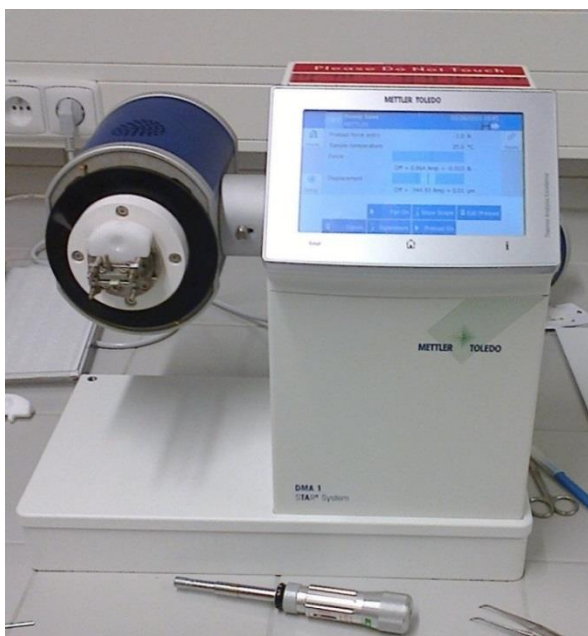
Technické parametre	Hodnota
Maximálna teplota	300 °C
Maximálna rýchlosť šneku	250 ot/min
Výkon motora	22 kW
Maximálny výkon	60 kg/hod



Obr. 13 Vytlačovací stroj Scientific LE45-30/CV

8.2 Meracie zariadenie DMA

Na meranie dynamickej mechanickej analýzy bol použitý prístroj METTLER TOLEDO DMA 1 vyobrazený na Obr. 14. DMA 1 je viacúčelové meracie zariadenie, ktoré sa používa na meranie mechanických vlastností viskoelastických materiálov ako funkcie teploty alebo frekvencie, kedy je materiál deformovaný vplyvom periodickej sily alebo posunu. Medzi materiály, ktoré môžu byť analyzované patria termoplasty, termosety, kompozity, elastomery, keramika a kovy. Základom DMA zariadenia sú dve vyvážené rovnobežné ramena, uložené na špeciálnych čapoch umiestnených blízko stredu ramien. Čapy sú vysoko presné torzné pružiny.



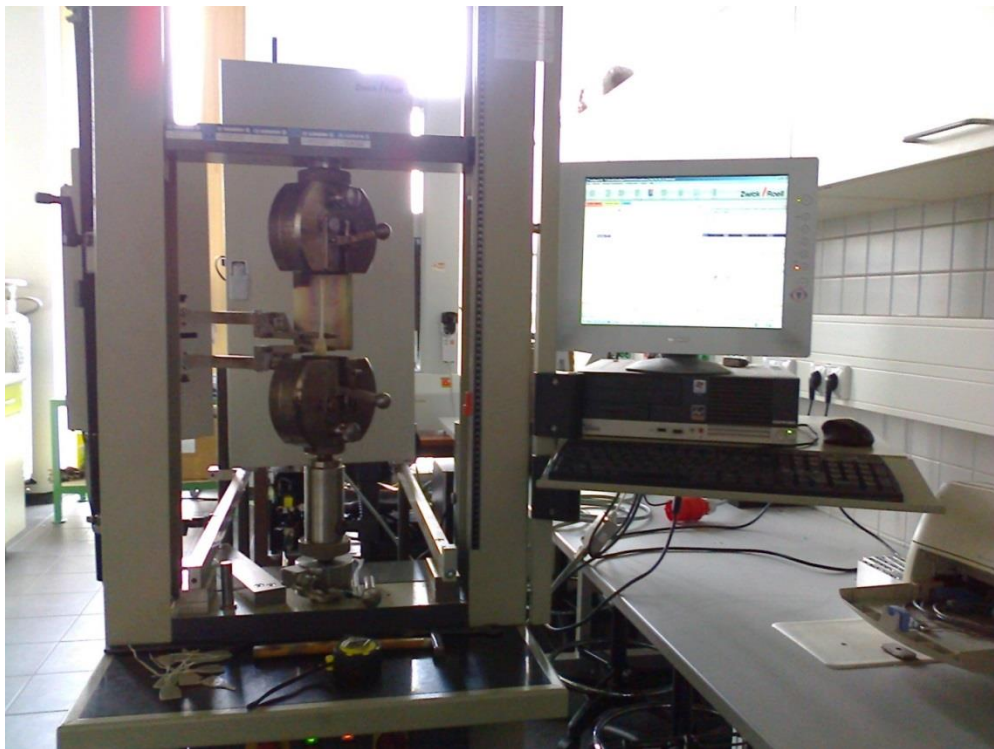
Obr. 14 Viacúčelové meracie zariadenie DMA 1

Tab. 8 Technické parametre prístroja METTLER TOLEDO DMA 1 [20]

Technické parametre	Hodnota
Teplotný rozsah	- 190 °C do 600 °C
Najvyššia sila	10 N
Minimálna sila	0,001 N
Rozsah frekvencie	0,001 – 300 Hz

8.3 Univerzálny skúšobný stroj

Na meranie mechanických vlastností bol použitý univerzálny skúšobný stroj Zwick 1456. S použitím testovacieho softwaru testXpert od výrobcu. Je možné na ňom robiť skúšky ťahové, tlakové a ohybové. Použitím rôznych upínacích prípravkov je možné robiť skúšky rôznych vzotiek a rôznych materiálov. K dispozícii sú dva snímače do 2,5 kN a do 20 kN. Ďalšou možnosťou je použitie teplotnej komory k meraniu pri rôznych teplotách. Stroj je ďalej vybavený extenzometrami pre spresnenie merania modulu pružnosti. Všetky výpočty na základe nameraných hodnôt robí software automaticky a zaznamenáva výsledky do tabuliek a grafov.



Obr. 15 Univerzálny skúšobný stroj Zwick 1456

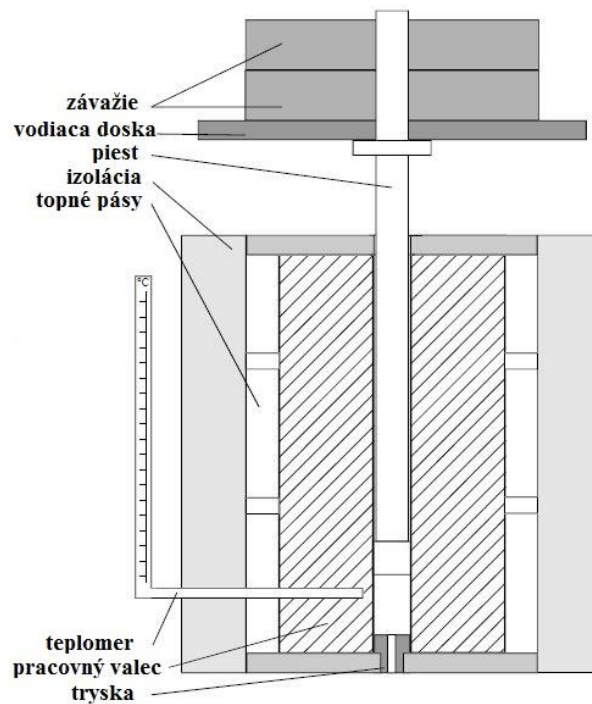
Tab. 9 Technické parametre univerzálneho skúšobného prístroja
Zwick 1456 [21]

Technické parametre	Hodnota
Maximálny posuv priečnikov	800 mm/min
Snímače sily	2,5 a 20 kN
Teplotná komora	- 80 do 250 °C
TestExpert software	Ťah/Ohyb/Tlak

8.4 Kapilárny vytlačovací plastometer

Na obr. 16 je schéma kapilárneho vytlačovacieho plastometra podľa ČSN 64 0861.

Pri meraní ITT na kapilárnom vytlačovacom plastometri je sledovaná závislosť hmotnostného prietoku taveniny pri konštantnom čase, zaťažení a teplote.



Obr. 16 Schéma kapilárneho vytlačovacieho plastometra

9 PREVEDENÉ MERANIA

9.1 Meranie mechanických vlastností

Na meranie mechanických vlastností boli použité skúšobné telieska podľa ČSN EN ISO 527 – 3 (64 0604) v tvare obojstrannej lopatky typu 5. Počet skúšobných teliesok bol 10 v každej sérii. Počiatočné rozpätie čelustí bolo 80 mm a nastavená 1 rýchlosť trhania.

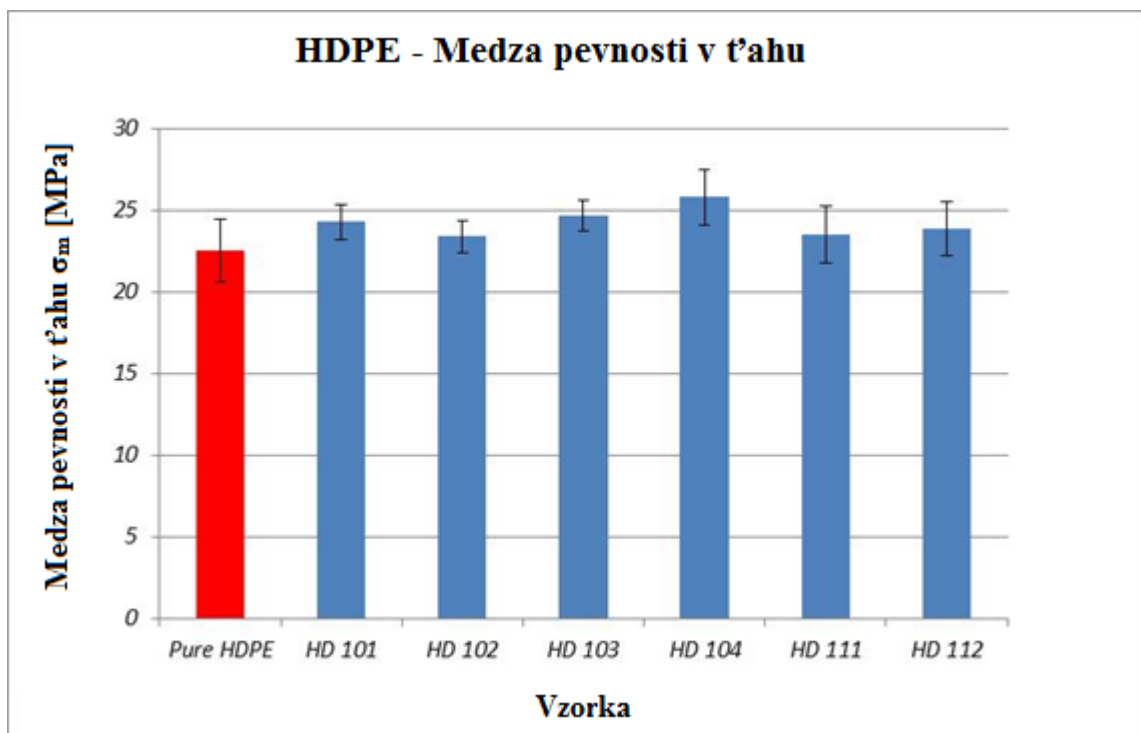
Tab. 10 Označenie a množstvo jednotlivých plnív a kompatibilizátora v pripravených zmesiach

Označenie vzorky	Kompatibilizátor	Plnivo		
	Maleniz. polyetylén PRIEX® (MAPE) [%]	Modifikovaný íl Cloisite 25A [%]	Uhlíčan vápenatý CaCO ₃ [%]	Oxid titaničitý TiO ₂ [%]
Pure HDPE	-	-	-	-
HD 101	3	5	-	
HD 102	3	10	-	
HD 103	3	-	5	
HD 104	3	-	10	
HD 105	7	5	-	
HD 106	7	10	-	
HD 107	7	-	5	
HD 108	7	-	10	
HD 109	15	5	-	
HD 110	15	10	-	
HD 111	3	-	-	5
HD 112	3	-	-	10
HD 113	7	-	-	5
HD 114	7	-	-	10
HD 115	15	-	-	5
HD 116	15	-	-	10

9.1.1 Výsledky merania medzi pevnosti v ťahu

Tab. 11 Namerané hodnoty medzi pevnosti v ťahu pri 3% obsahu MAPE

Vzorka	σ_m - medza pevnosti v ťahu [MPa]	s \pm
Pure HDPE	22,5	1,92
HD 101 / 5% Cloisite 25A	24,3	1,06
HD 102 / 10% Cloisite 25A	23,4	1
HD 103 / 5% CaCO ₃	24,7	0,95
HD 104 / 10% CaCO ₃	25,8	1,72
HD 111 / 5% TiO ₂	23,5	1,73
HD 112 / 10% TiO ₂	23,9	1,64

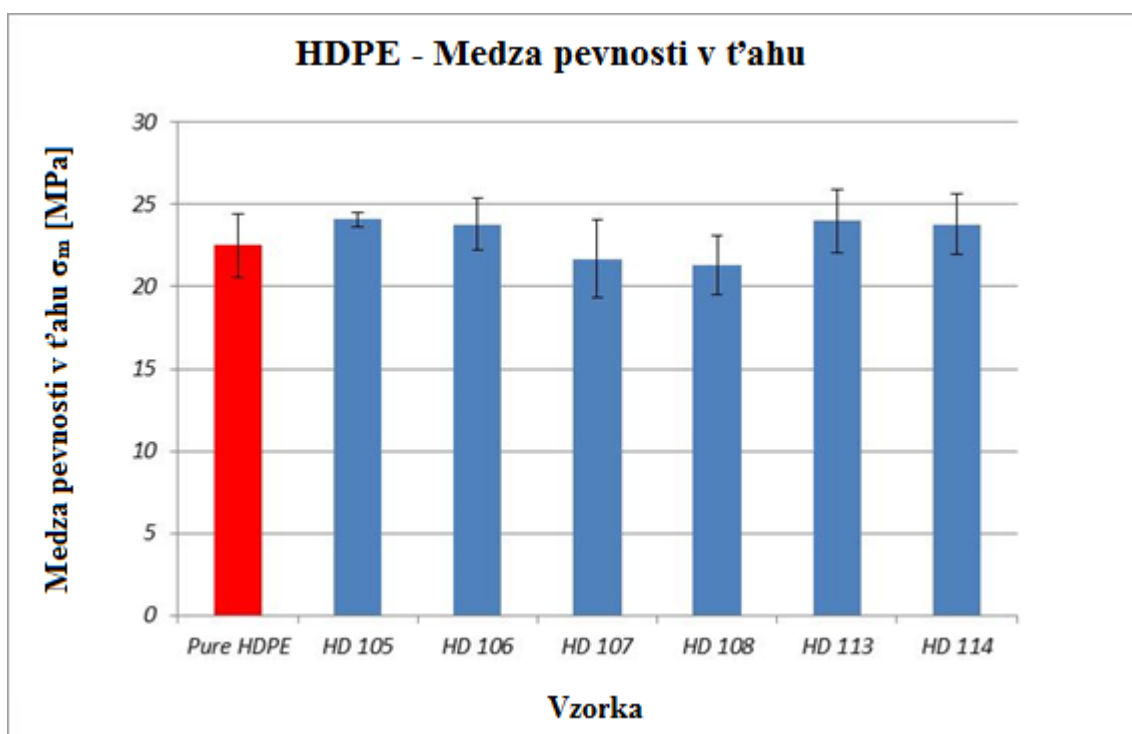


Obr. 17 Porovnanie medzi pevnosti v ťahu pri HDPE s 3% obsahom MAPE

Graf znázorňuje zmenu medzi pevnosti v ťahu HDPE s 3% obsahom kompatibilizátora. Medza pevnosti v ťahu bola najvyššia na vzorke HD 104, ktorá bola plnená 10% uhličitanu vápenatého CaCO₃. Oproti čistému HDPE každá vzorka s plnivom zaznamenala vyššiu hodnotu.

Tab. 12 Namerané hodnoty medzi pevnosti v ťahu pri 7% obsahu MAPE

Vzorka	σ - medza pevnosti v ťahu [MPa]	s \pm
Pure HDPE	22,5	1,92
HD 105 / 5% Cloisite 25A	24,1	0,44
HD 106 / 10% Cloisite 25A	23,8	1,59
HD 107 / 5% CaCO ₃	21,7	2,35
HD 108 / 10% CaCO ₃	21,3	1,8
HD 113 / 5% TiO ₂	24	1,93
HD 114 / 10% TiO ₂	23,8	1,84

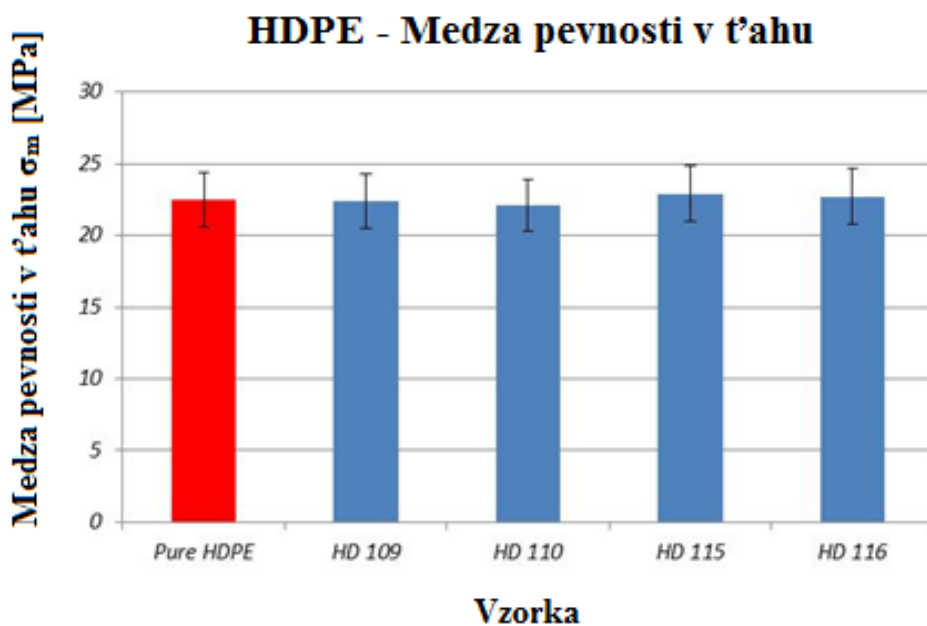


Obr. 18 Porovnanie medzi pevnosti v ťahu pri HDPE s 7% obsahom MAPE

Pri použití 7% MAPE je na grafe možné vidieť, že všetky porovnávané vzorky majú veľmi podobné hodnoty medzi pevnosti v ťahu k čistému HDPE. U vzoriek HD 107 / 5% CaCO₃ a HD 108 / 10% CaCO₃ bola nameraná ešte nižšia hodnota medzi pevnosti v ťahu ako pri čistom HDPE.

Tab. 13 Namerané hodnoty medzi pevnosti v ťahu pri 15% obsahu MAPE

Vzorka	σ - medza pevnosti v ťahu [MPa]	s ±
Pure HDPE	22,5	1,92
HD 109 / 5% Cloisite 25A	22,4	1,86
HD 110 / 10% Cloisite 25A	22,1	1,84
HD 115 / 5% TiO ₂	22,9	1,96
HD 116 / 10% TiO ₂	22,7	1,93

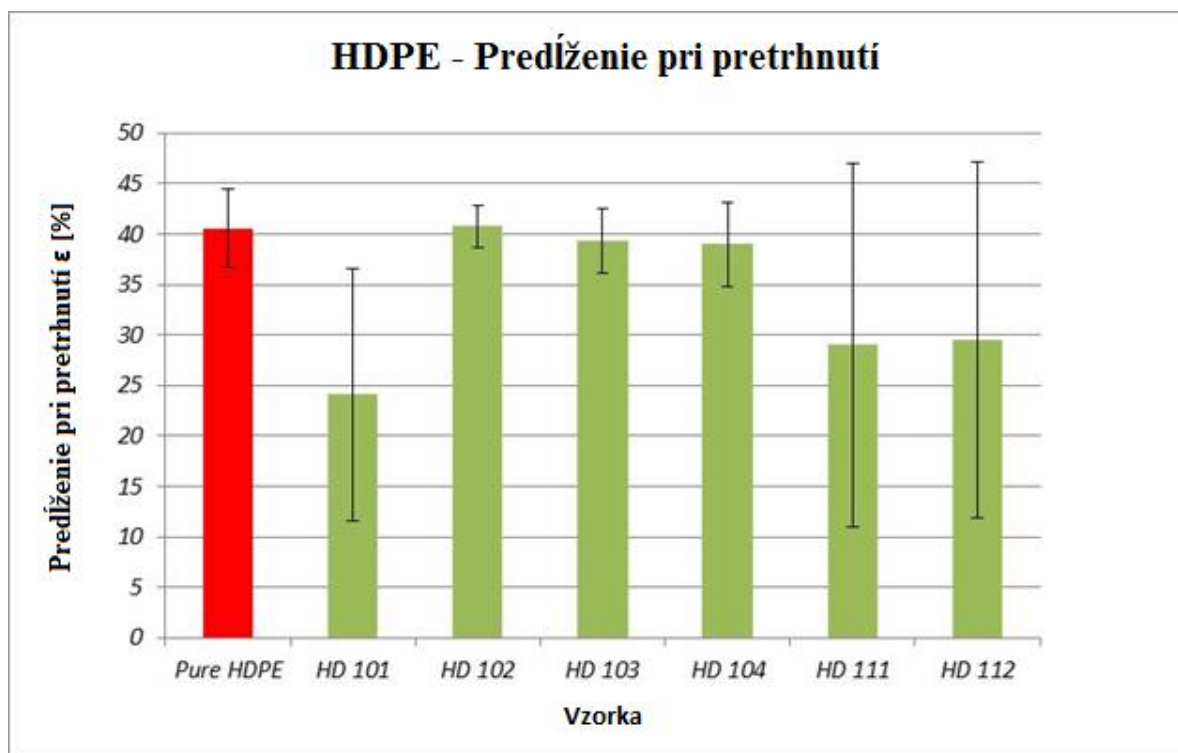


Obr. 19 Porovnanie medzi pevnosti v ťahu pri HDPE s 15% obsahom MAPE

V koncentrácii 15% kompatibilizátora MAPE sa medza pevnosti u všetkých vzoriek vyrovnávala a pohybovala sa v hodnotách okolo 22,5 MPa.

Tab. 14 Namerané hodnoty predĺženia pri pretrhnutí pri 3% obsahu MAPE

Vzorka	ε - predĺženie pri pretrhnutí [%]	s ±
Pure HDPE	40,6	3,8
HD 101 / 5% Cloisite 25A	24,1	12,5
HD 102 / 10% Cloisite 25A	40,8	2,1
HD 103 / 5% CaCO ₃	39,3	3,2
HD 104 / 10% CaCO ₃	39	4,2
HD 111 / 5% TiO ₂	29	18
HD 112 / 10% TiO ₂	29,5	17,6

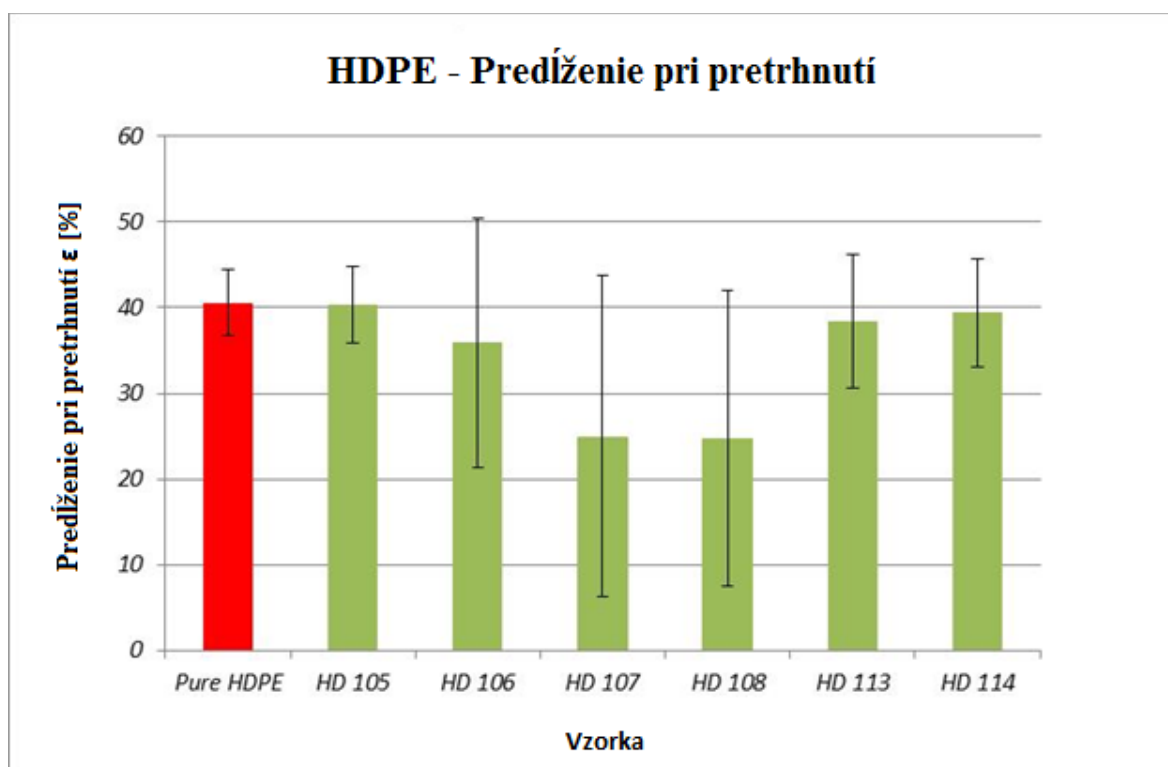


Obr. 20 Porovnanie predĺženia pri pretrhnutí pri HDPE s 3% obsahom MAPE

Z obr. 20 vyplýva, že pri použití 3% kompatibilizátora hodnoty predĺženia pri pretrhnutí veľmi kolísali a to najmä na vzorke HD 101 / 5% podiel ílu. Vzorka má aj výrazne nižšie predĺženie oproti čistému HDPE. Nižšie hodnoty zaznamenali aj vzorky HD 111 a HD 112 plnené oxidom titaničitým. U spomínaných troch vzoriek je možné vidieť aj pomerne veľkú smerodajnú odchýlku.

Tab. 15 Namerané hodnoty predĺženia pri pretrhnutí pri 7% obsahu MAPE

Vzorka	ε - predĺženie pri pretrhnutí [%]	s ±
Pure HDPE	40,6	3,8
HD 105 / 5% Cloisite 25A	40,4	4,5
HD 106 / 10% Cloisite 25A	35,9	14,5
HD 107 / 5% CaCO ₃	25	18,7
HD 108 / 10% CaCO ₃	24,7	17,3
HD 113 / 5% TiO ₂	38,5	7,8
HD 114 / 10% TiO ₂	39,4	6,3

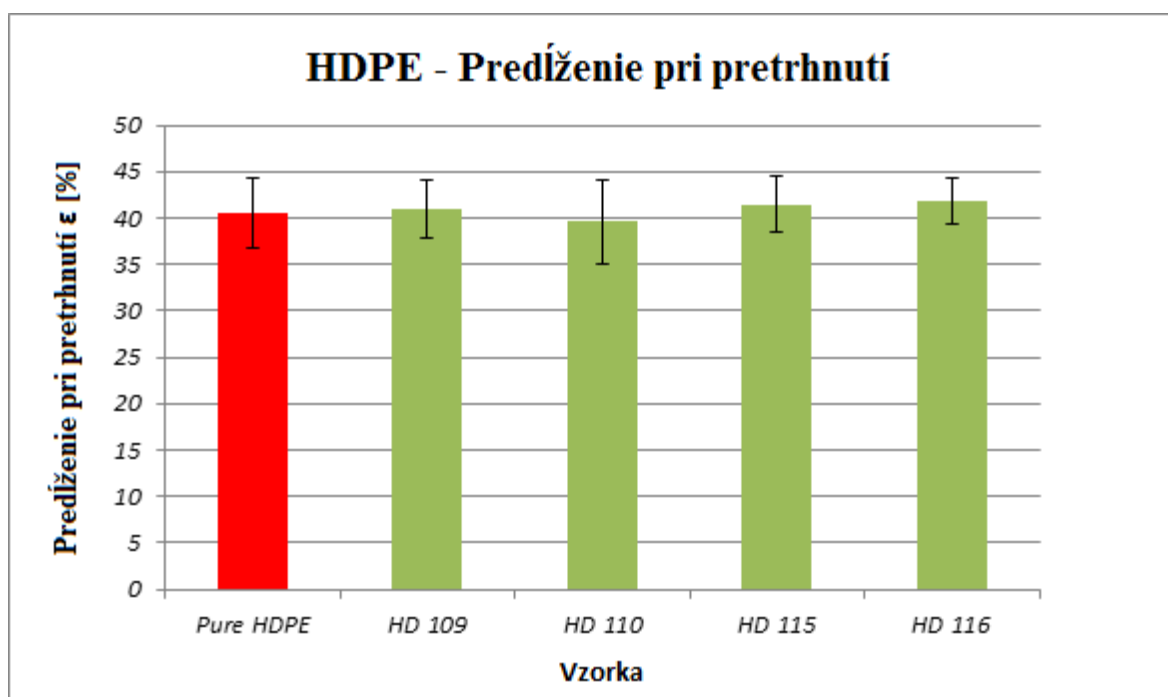


Obr. 21 Porovnanie predĺženia pri pretrhnutí pri HDPE s 7% obsahom MAPE

Pri použití 7% MAPE vzorky plnené uhličitanom vápenatým zaznamenali 25% predĺženie, čo predstavuje výraznú nižšiu hodnotu oproti iným vzorkám s rovnakým množstvom kompatibilizátora a taktiež nižšiu hodnotu oproti čistej HDPE. Taktiež u týchto vzoriek bola zaznamenaná aj veľká smerodajná odchýlka.

Tab. 16 Namerané hodnoty predĺženia pri pretrhnutí pri 15% obsahu MAPE

Vzorka	ϵ - predĺženie pri pretrhnutí [%]	s ±
Pure HDPE	40,6	3,8
HD 109 / 5% Cloisite 25A	41	3,2
HD 110 / 10% Cloisite 25A	39,6	4,5
HD 115 / 5% TiO ₂	41,5	3,1
HD 116 / 10% TiO ₂	41,9	2,5

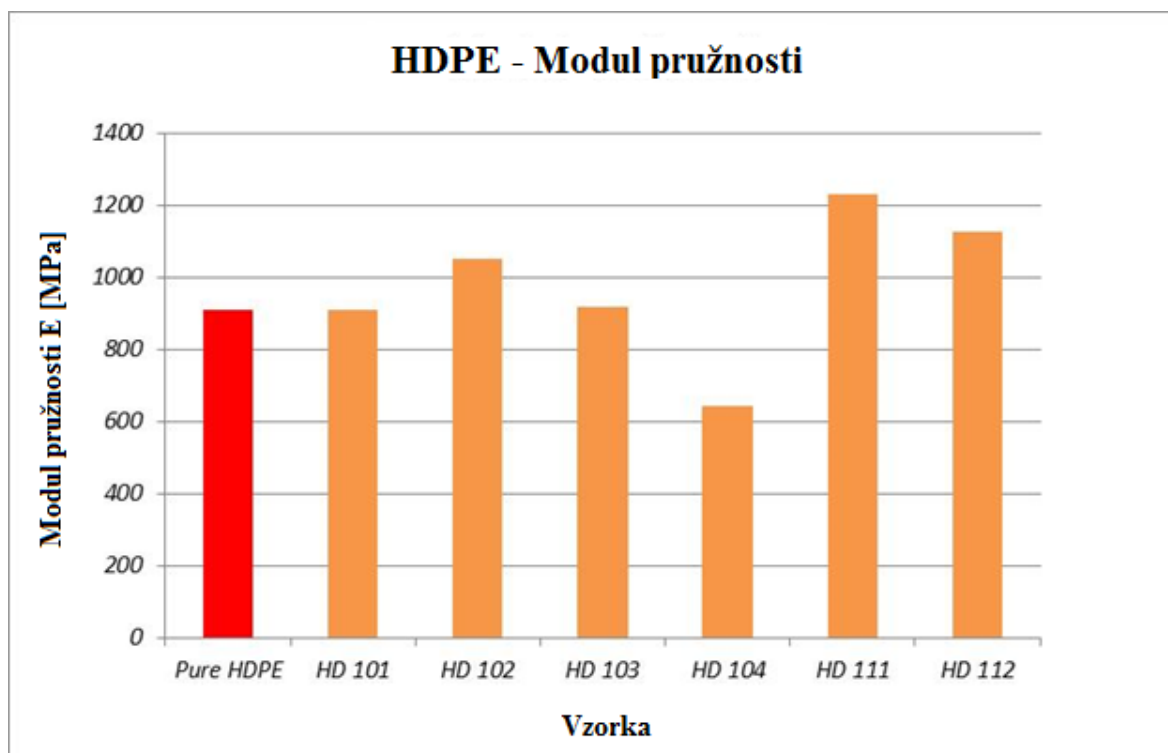


Obr. 22 Porovnanie predĺženia pri pretrhnutí pri HDPE s 15% obsahom MAPE

Podobne ako tomu bolo aj pri meraní medzi pevnosti v ťahu aj pri meraní predĺženia pri pretrhnutí sa hodnoty všetkých meraných vzoriek s obsahom MAPE 15% takmer rovnali a pohybovali sa okolo hodnoty 40%.

Tab. 17 Namerané hodnoty modulu pružnosti pri 3% obsahu MAPE

Vzorka	E - modul pružnosti [MPa]
Pure HDPE	911
HD 101 / 5% Cloisite 25A	910
HD 102 / 10% Cloisite 25A	1051
HD 103 / 5 % CaCO ₃	920
HD 104 / 10% CaCO ₃	644
HD 111 / 5% TiO ₂	1232
HD 112 / 10% TiO ₂	1128

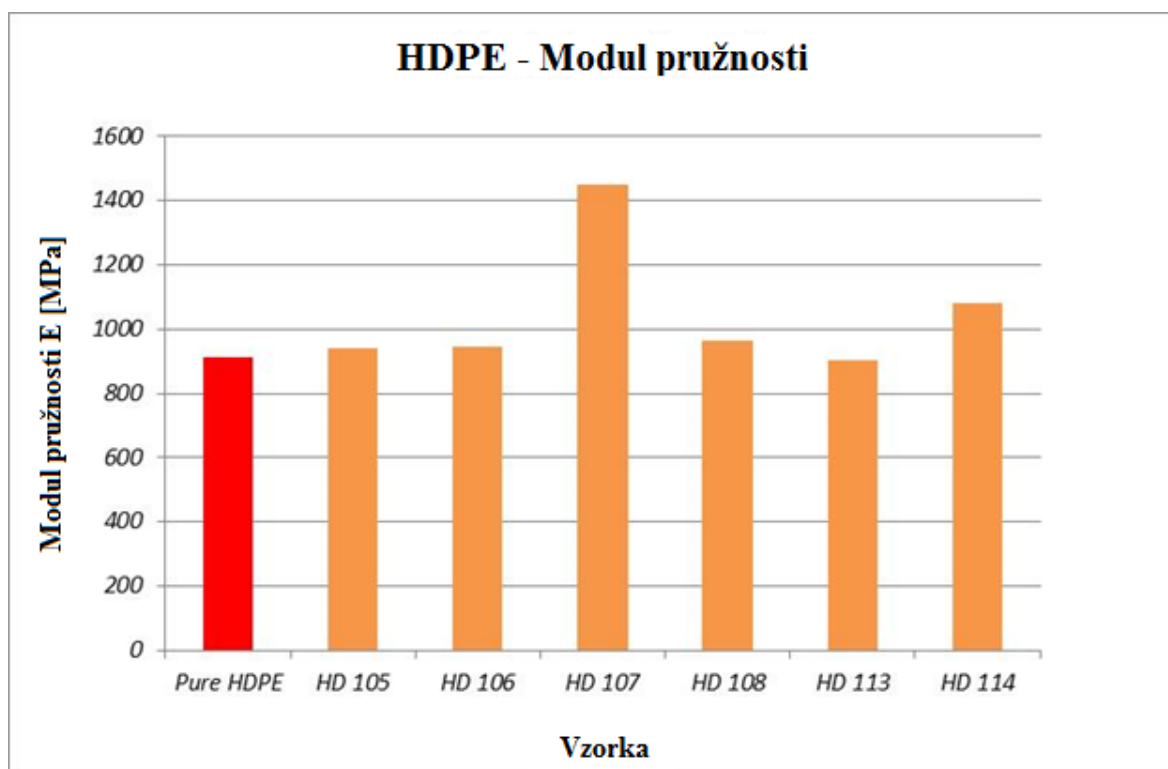


Obr. 23 Porovnanie modulu pružnosti pri HDPE s 3% obsahom MAPE

Pri meraní modulu pružnosti je vidieť kolísanie hodnôt jednotlivých vzoriek a najmä výrazne nižší modul pružnosti na vzorke HD 104 / 10% CaCO₃ oproti čistému HDPE. A naopak u vzoriek HD 111 a HD 112 plnených oxidom titaničitým vidieť výrazne väčší modul pružnosti.

Tab. 18 Namerané hodnoty modulu pružnosti pri 7% obsahu MAPE

Vzorka	E - modul pružnosti [MPa]
Pure HDPE	911
HD 105 / 5% Cloisite 25A	942
HD 106 / 10% Cloisite 25A	947
HD 107 / 5% CaCO ₃	1452
HD 108 / 10% CaCO ₃	966
HD 113 / 5% TiO ₂	904
HD 114 / 10% TiO ₂	1080

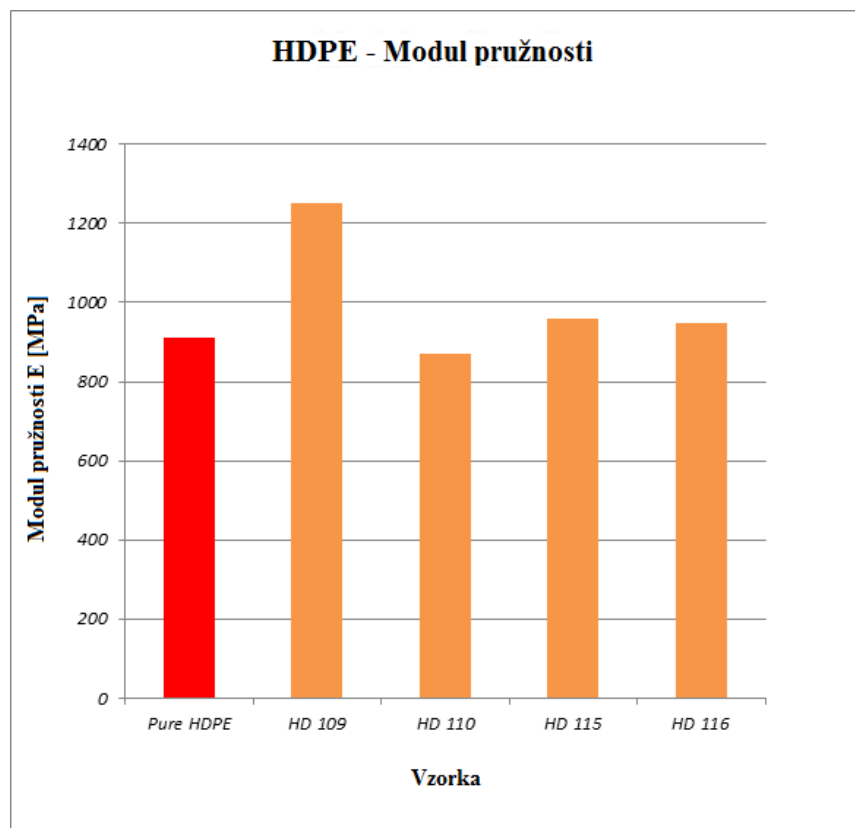


Obr. 24 Porovnanie modulu pružnosti pri HDPE s 7% obsahom MAPE

V grafe možno vidieť, že pri použití 7% množstva MAPE jednotlivé vzorky rovnali až na vzorku HD 107 plnenú 5% uhličitanom vápenatým, ale táto odchýlka mohla byť spôsobená aj nepresnosťou merania.

Tab. 19 Namerané hodnoty modulu pružnosti pri 15% obsahu MAPE

Vzorka	E - modul pružnosti [MPa]
Pure HDPE	911
HD 109 / 5% Cloisite 25A	1252
HD 110 / 10% Cloisite 25A	869
HD 115 / 5% TiO ₂	960
HD 116 / 10% TiO ₂	947



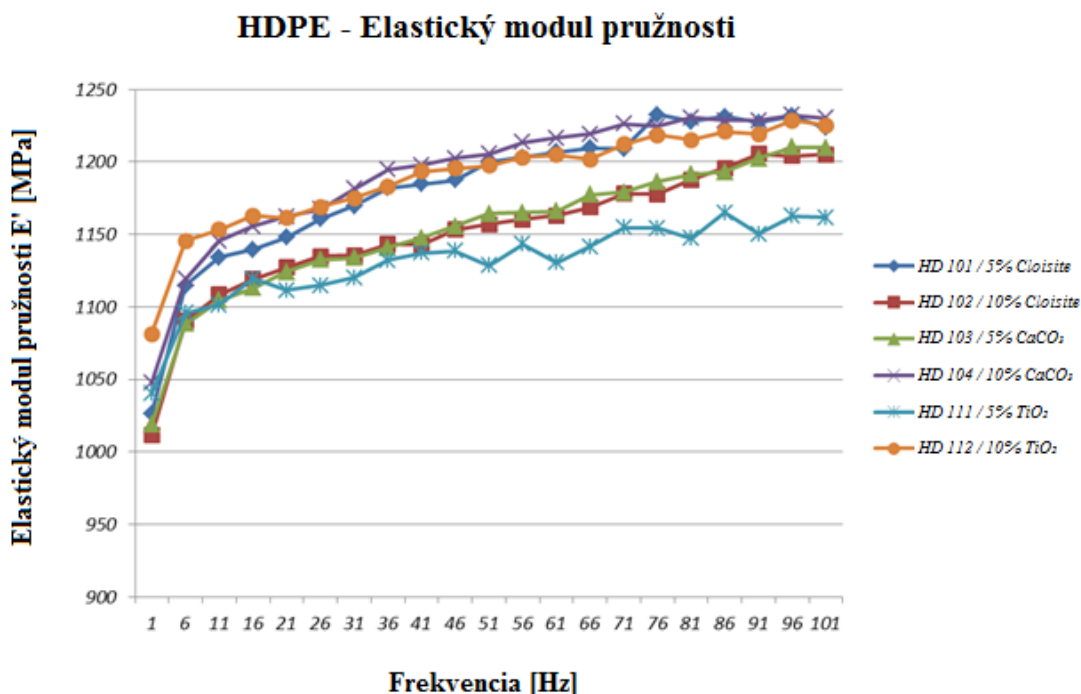
Obr. 25 Porovnanie modulu pružnosti pri HDPE s 15% obsahom MAPE

Podobne ako pri vzorkách s obsahom MAPE 7% aj v tomto prípade je možné z grafu vyčítať, že vzorky s 15% obsahom MAPE majú takmer rovnaké hodnoty, len pri vzorke HD 109 plnenej ílom Cloisite 25A dosahuje hodnota modulu pružnosti 1252 MPa, ale taktiež spomínaná odchýlka môže byť spôsobená chybou merania.

9.2 Meranie dynamickej mechanickej analýzy DMA

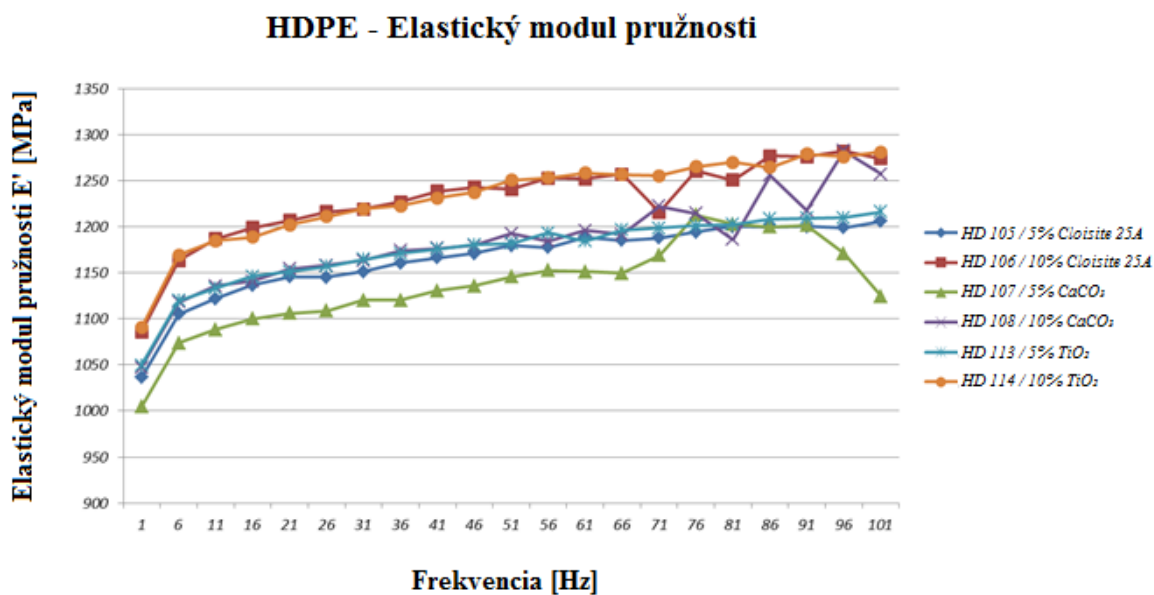
Medzi ramená DMA prístroja sa do špeciálneho držiaku upla vzorka, ktorá vytvárala rezonančný systém. Rezonančným systémom je myslená rezonančná frekvencia závislá na module a geometrii vzorky. Celé zariadenie bolo umiestnené v termostatickom prostredí, ktoré umožňuje jak izotermné meranie, tak meranie pri zmene teploty, obvykle od -150 do 500 °C. Deformácia vzoriek bola spôsobená dvoma protichodnými momentami rovnakej veľkosti, ktoré pôsobia na protiľahlé konce vzorky upnutej do svoriek.

9.2.1 Výsledky merania elastického modulu pružnosti



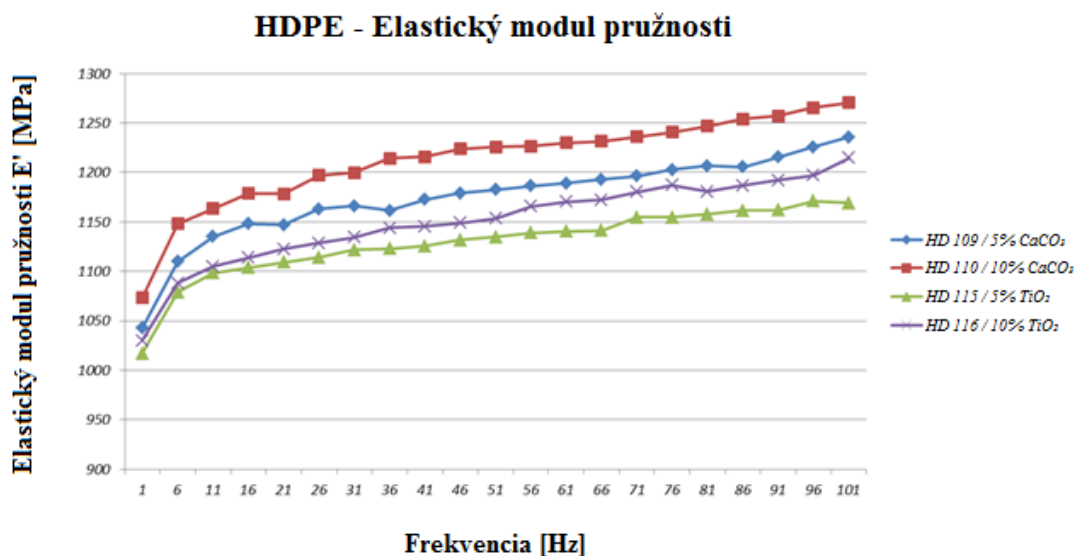
Obr. 26 Závislosť elastického modulu pružnosti na frekvenciu pri 3% obsahu MAPE

Pri meraní elastického modulu pružnosti v závislosti na frekvenciu vidieť, že so stúpajúcou frekvenciou sa zvyšuje aj elastický modul pružnosti. Najvyšší modul bol zaznamenaný pri vzorkách HD 101, HD 104 a HD 112. Naopak najnižší bol nameraný na vzorke HD 111 plnenej 5% oxidom titaničitým.



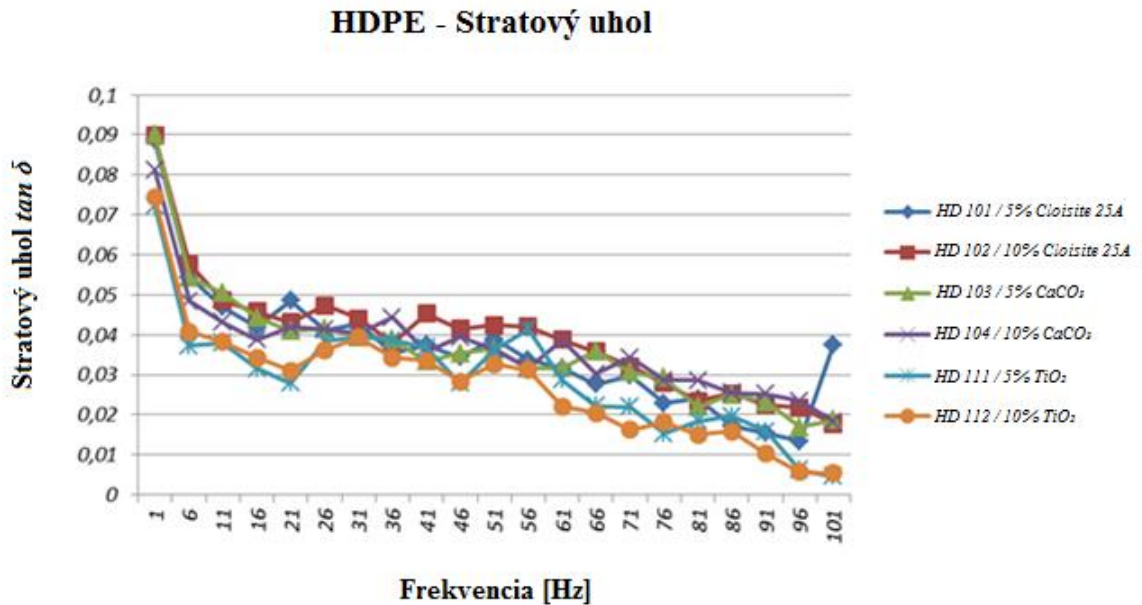
Obr. 27 Závislosť elastického modulu pružnosti na frekvenciu pri 7% obsahu MAPE

Aj pri 7% obsahu kompatibilizátora vzorky zaznamenali stúpanie so zvyšujúcou sa frekvenciou. Ako je možné vyčítať z grafu vzorka HD 107 / 5% CaCO₃ zaznamenala klesajúci elastický modul pružnosti pri frekvencii 91 Hz a rovnako aj vzorka HD 108 s 10% obsahom CaCO₃ od frekvencie 76 Hz zaznamenala nelineárne stúpanie so vzrastajúcou frekvenciou.



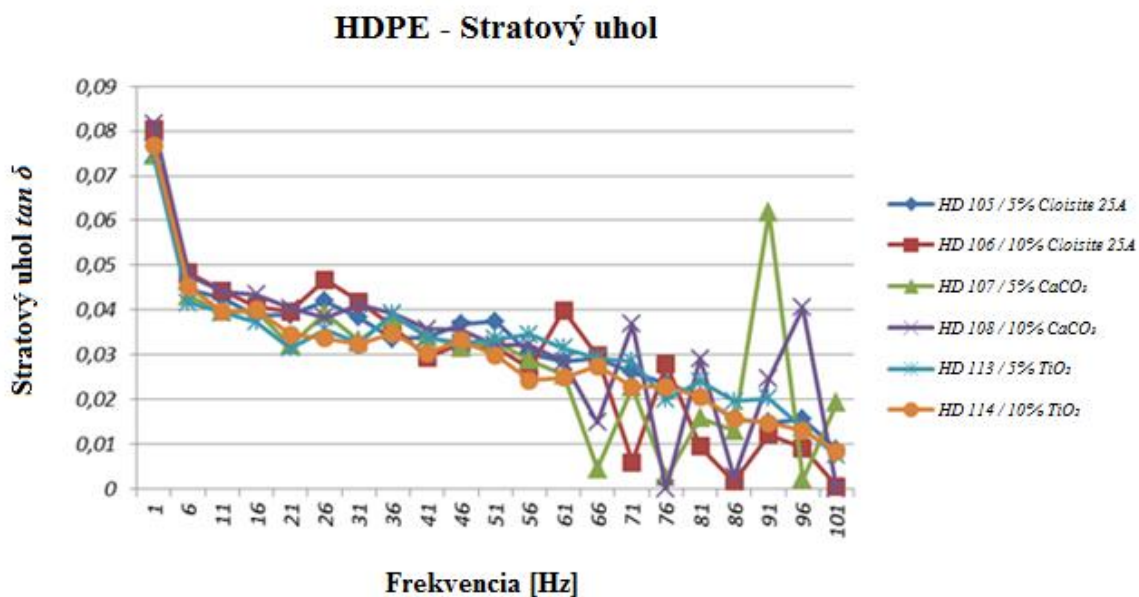
Obr. 28 Závislosť elastického modulu pružnosti na frekvenciu pri 15% obsahu MAPE

Z grafu na obr. 28 je možné vidieť, že všetky vzorky pri rovnakom obsahu MAPE 15% majú lineárne stúpanie s rastúcou frekvenciou. Najvyšší elastický modul pružnosti je pri vzorkách plnených uhličitanom vápenatým, pri vzorkách plnených oxidom titaničitým je elastický modul nižší.



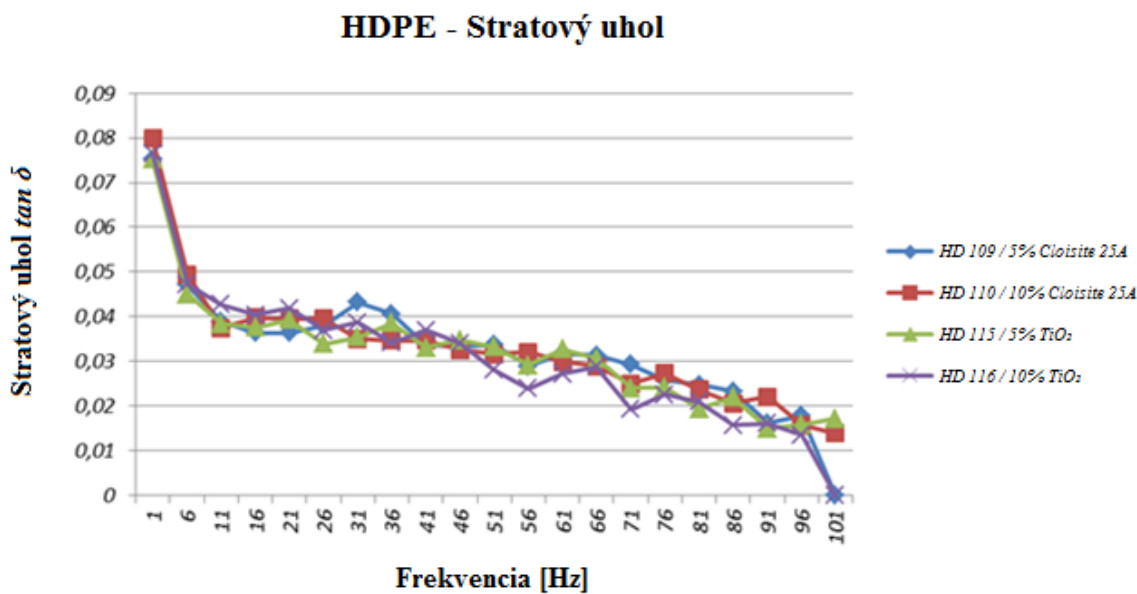
Obr. 29 Závislosť stratového uhla na frekvenciu pri 3% obsahu MAPE

Pri závislosti stratového uhla $\tan \delta$ na frekvenciu je možné vidieť, že so stúpajúcou frekvenciou sa hodnota stratového činiteľa znižuje, len pri vzorke HD 101 / 5% obsah ílu od frekvencie 96 Hz stratový uhol náhle vzrastá.



Obr. 30 Závislosť stratového uhla na frekvenciu pri 7% obsahu MAPE

Ako je možné vidieť na obr. 30 vzorky plnené ílom Cloisite 25A aj uhlíčitánom vápenatým zaznamenávajú výrazné kolísanie od frekvencie cca 61 Hz, ale vzorky HD 113 a HD 114 plnené oxidom titaničitým zamenávajú lineárne klesanie hodnoty stratového uhla až po frekvenciu 101 Hz.



Obr. 31 Závislosť stratového uhla na frekvenciu pri 15% obsahu MAPE

Pri vzorkách s 15% obsahom MAPE stratový uhol $\tan \delta$ sa so zvyšujúcou frekvenciou znižuje. Až od frekvencie 96 Hz sa pri vzorkách HD 109 a HD 116 stratový uhol výrazne zníži a až po túto frekvenciu sa znižuje lineárne.

9.3 Meranie indexu toku taveniny

Pred zahájením skúšky sa valec vyhrial na zvolenú teplotu, na ktorej sa nechal cca 15 min. Následne sa valec vyplnil daným materiálom, počas ktorého bol ručne stlačovaný pechovacou tyčkou cca 1 min (vznik oxidácie). Piest bol následne spustený do valca a prebiehal predohev. Po čase, za ktorý sa teplota vrátila späť na zvolenú hodnotu sa na piest umiestnilo zvolené závažie. Pre toto meranie bolo použité závažie 5 kg. Piest sa nechal volne klešať. Následne, hneď ako začala vytekať vzorka, sustili sa stopky a každých 60 s sa odrezala vzorka rezným nástrojom. Takto sa postupne pripravilo 10 vzoriek z každého typu zmesi. Po ochladení sa odrezky zväžili a vypočítala sa priemerná hodnota hmotnosti odrezku.

9.3.1 Výsledky merania indexu toku taveniny

Tab. 20 Namerané hodnoty hmotností vzoriek pri meraní indexu toku taveniny

Vzorka	Priemerná hmotnosť odrezku [g]
Pure HDPE	0,0894
HD 101 / 3% MAPE + 5% Cloisite 25A	0,0541
HD 102 / 3% MAPE + 10% Cloisite 25A	0,0514
HD 103 / 3% MAPE + 5% CaCO ₃	0,0543
HD 104 / 3% MAPE + 10% CaCO ₃	0,0555
HD 105 / 7% MAPE + 5% Cloisite 25A	0,0541
HD 106 / 7% MAPE + 10% Cloisite 25A	0,0515
HD 107 / 7% MAPE + 5% CaCO ₃	0,0564
HD 108 / 7% MAPE + 10% CaCO ₃	0,0537
HD 109 / 15% MAPE + 5% Cloisite 25A	0,064
HD 110 / 15% MAPE + 10% Cloisite 25A	0,0591
HD 111 / 3% MAPE + 5% TiO ₂	0,0574
HD 112 / 3% MAPE + 10% TiO ₂	0,0562
HD 113 / 7% MAPE + 5% TiO ₂	0,0626
HD 114 / 7% MAPE + 10% TiO ₂	0,0614
HD 115 / 15% MAPE + 5% TiO ₂	0,0644
HD 116 / 15% MAPE + 10% TiO ₂	0,0641

Hmotnostný index toku taveniny (MFR) [g/10min] je daný rovnicou:

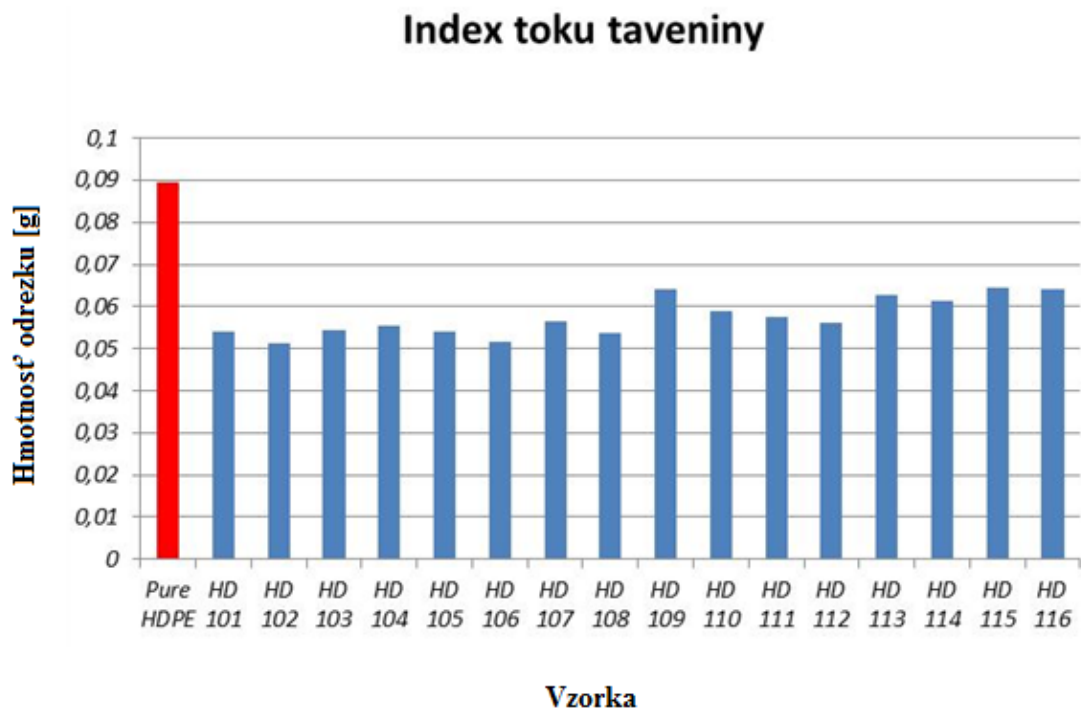
$$MFR_{(T, m_{nom})} = \frac{t_{ref} \cdot m}{t} = \frac{600 \cdot 0,0894}{60} = 0,894 \text{ g/10min}$$

kde je: T...skúšobná teplota taveniny [190°C]

m_{nom} ...nominálne zaťaženie [5kg]

t_{ref} ...referenčný čas [s] (10min=600s)

t.....interval odrezávania (s)



Obr. 32 Grafické porovnanie hmotností vytlačených odrezkov

Z porovnaní hmotností vytlačených odrezkov vyplýva, že po pridaní plniva sa vo všetkých meraných vzorkách znížil index toku taveniny a tým aj bola nižšia hmotnosť vzorky v porovnaní so vzorkou z čistého HDPE. Z grafu je možné vyčítať, že so zvyšovaním obsahu MAPE sa zvyšoval index toku taveniny. Najlepší index toku taveniny zaznamenali vzorky plnené oxidom titaničitým.

ZÁVER

Náplňou diplomovej práce bolo zistiť vplyv druhu a koncentrácie kompatibilizátora na vlastnosti plneného HDPE.

V teoretickej časti bola pozornosť venovaná popísaniu polymérnych materiálov, ich rozdeleniu podľa pôvodu, elasticko-plastických vlastností, podľa chemickej reakcie, podľa nadmolekulárnej štruktúry, deleniu z hľadiska molekulárnej štruktúry a podľa druhu prísad. V ďalšej časti boli popísané polyolefíny so zameraním sa hlavne na HDPE vysokohustotný polyetylén a LDPE nízko-hustotný polyetylén, kde boli porovnávané aj vlastnosti jednotlivých typov polyetylénov a ich možné spracovanie a použitie. Ďalšou kapitolou boli plnivá, kde boli charakterizované ich vlastnosti a chemické zloženie. V tejto časti bola pozornosť venovaná aj nanoplňivám, kde bolo spomenuté ich rozdelenie. Posledná kapitola teoretickej časti bola zameraná na kompatibilizátory a ich využitie.

V praktickej časti boli pripravené zmesi z čistého HDPE, kompatibilizátora a plnív. Ako kompatibilizátor bol použitý malenizovaný polyetylén PRIEX[®] a ako plnivá boli použité modifikovaný íl Cloisite[®] 25A, uhličitan vápenatý CaCO₃ a oxid titaničitý TiO₂. Z jednotlivých materiálov sa pripravili zmesi, z ktorých pomocou vytlačovacieho stroja Scientific LE45-30/CV boli vytlačené struny a z tých na ručnom vyhrievanom lise lisované dosičky a následne vyseknuté skúšobné telieska. Na meraných vzorkách boli na skúšobnom stroji Zwick 1456 merané mechanické vlastnosti a to medza pevnosti v ťahu σ_m , predĺženie pri pretrhnutí ε a modul pružnosti E. Dynamické mechanické vlastnosti boli merané na viacúčelovom meracom zariadení METTLER TOLEDO DMA1, kde bola meraná závislosť elastického modulu pružnosti E' na frekvenciu a závislosť stratového uhla $\tan \delta$ na frekvenciu pri rôznych koncentráciach kompatibilizátora a plnív. Na záver bol na kapilárnom vytlačovacom plastometri meraný index toku taveniny. Výsledky boli štatisticky spracované a vyhodnotené pomocou grafov a tabuliek.

Z výsledkov meraní medzi pevnosti v ťahu vyplynulo, že so zvyšovaním obsahu kompatibilizátora sa medza pevnosti v ťahu znižovala a odchýlky medzi jednotlivými vzorkami sa zmenšovali. Najväčšie kolísanie hodnôt bolo pri vzorkách plnených 7% obsahom MAPE, kde vzorka HD 105 s 5% podielom ílu dosahovala na medzu pevnosti v ťahu 24,1 MPa a vzorka HD 108 s 10% podielom uhličitanu vápenatého 21,3 MPa. Pri meraní predĺženia pri pretrhnutí na vzorkách s obsahom 3 – 10% MAPE vychádzala veľká smerodajná odchýlka, ktorá bola spôsobená chybou merania. Pri vzorkách s obsahom MAPE 15% sa

všetky vzorky takmer rovnali a predĺženie pri pretrhnutí sa pohybovalo okolo 40%. Pri meraní modulu pružnosti boli taktiež zaznamenané odchýlky najmä pri vzorkách HD 107 / 5% obsah CaCO_3 a HD 109 / 5% obsah Cloisite 25A. Meranie dynamickej analýzy DMA bolo vidieť, že so stúpajúcou frekvenciou sa zvyšoval aj elastický modul pružnosti a naopak pri meraní stratového uhla $\tan \delta$ sa so zvyšujúcou frekvenciou sa stratový uhol znižoval. Meralo sa pri frekvenciách 1 – 101 Hz. Pri meraní indexu toku taveniny bolo zrejmé, že so zvyšujúcim obsahom kompatibilizátora MAPE sa index toku taveniny zvyšoval.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] *Polymerné technické materiály: Vysoškolská ucebnica pre technické smery* [online]. [cit. 2014-12-14]. Dostupné z:
http://kmi2.uniza.sk/wpcontent/uploads/2010/10/polymerne_konstrucne_materialy.pdf
- [2] *Technologie II. Katedra strojírenské technologie* [online]. [cit. 2015-01-12]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm#012
- [3] *Polymérne konštrukčné materiály: Odborná publikácia* [online]. [cit. 2015-01-15]. Dostupné z:
<http://kmi2.uniza.sk/wp-content/uploads/2009/10/POLYMERY-Po-RECENZII.pdf>
- [4] ROTHON, R.: *Particulate – Filled Polymer Composites*. 1996. ISBN 0-582-08782-1.
- [5] KHUNOVA, V. - SAIN, M.M.: *New Developments in Reactive Processing of Thermoplastic Composites. Advanced Polymer Processing Operations*. 2008, 187-212, ISBN-10: 0-8155-1426-3.
- [6] DAVE, R.S. - LOOS, A.C.: *Processing of Composites*. Carl Hanser Verlag, 2000. ISBN 3-446-18044-3.
- [7] PINNAVAIA, M. T. J. - BEALL, G. W.: *Polymer-clay nanocomposites*. Wiley-VCH Chichester, 2008. ISBN 0471637009.
- [8] DRESSELHAUS, M. S. - DRESSELHAUS, G. - AVOURIS, P.: *Carbon Nanotubes, Synthesis, Structure, Properties and Applications*. 2000. ISBN- 1437-0859.
- [9] KRATOCHVÍL, B. - ŠVORČÍK, V. - VOJTĚCH, D.: *Úvod do studia materiálů*, 1.vyd. VŠCHT v Praze, 2005. ISBN 80-7080-568-4.

- [10] ZHENG, X. - JUANY, D. D.: *Polystyrene nanocomposites based on an oligomerically - modified clay containing maleic anhydride*, Polymer Degradation and Stability, 2006. Vol. 91, 108-113.
- [11] DHARAIYA, D. – JANA, S. C.: *Thermal decomposition of alkyl ammonium ions and its effects on surface polarity of organically treated nanoclay*, Polymer, Vol. 46, Issue 23, 2005. 10139-10147.
- [12] ULTRACKI, L. A.: *Commercial Polymer Blends*, Springer – Verlag, 1998. ISBN: 978-0-412-81020-6.
- [13] *DOW, HDPE* [online]. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z:
<http://catalog.ides.com/docselect.aspx?I=70673&E=49382&DOC=DOWTDS&DS=123&DK=STD&DC=en>
- [14] *PRIEX* [online]. [cit. 2015-04-19]. Dostupné z:
<http://www.addcomp.nl/products/product-brands/16-priex>
- [15] *BYK Cloisite* [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z:
<http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=6fdb704921384d2289e99adab1d39d7d>
- [16] *Oxid titaničitý* [online]. [cit. 2015-04-20]. Dostupné z:
http://sk.wikipedia.org/wiki/Oxid_titani%C4%8Dit%C3%BD
- [17] *Uhličitan vápenatý* [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Uhli%C4%8Ditan_v%C3%A1penat%C3%BD
- [18] KRATINA, J.: *Stabilita kompozitních materiálů v biotickém prostředí*. Zlín, 2005. 90 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [19] *LABTECH, Screw Extruder* [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z:
<http://www.milabtech.com/extruders%20lab.htm>

- [20] *METTLER TOLEDO, DMA 1* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z:
http://sk.mt.com/sk/sk/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/TA_Family_Browse/DMA/DMA1.html
- [21] *Zwick / Roell / Zwick 1456* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z:
http://www.zwick.de/fileadmin/content/UZ_Gebrauchtmarkt/pdf/1015086.pdf

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

PE	Polyetylén
PP	Polypropylén
PS	Polystyrén
PVC	Polyvinylchlorid
PA	Polyamid
PE-LD	Nízkohustotný polyetylén
PE-HD	Vysokohustotný polyetylén
PE-MD	Strednohustotný polyetylén
PE-LLD	Lineárny nízkohustotný polyetylén
PE-VLD	Veľmi nízkohustotný polyetylén
MPE-LLD	Metalocenový lineárny nízkohustotný polyetylén
PE- UHMW	Ultravysokomolekulový polyetylén
PE-X	Zosieťovaný polyetylén
MAPE	Malenizovaný polyetylén
T _m	Teplota tavenia
T _f	Teplota viskózneho toku
m	Hmotnosť vzorky
DMA	Dynamická mechanická analýza
MWNT	Mnohostenné nanorúrky
SWNT	Jednostenné nanorúrky
L1	Šírka zúženej rovnobežnej časti
L2	Celková dĺžka
L3	Počiatočná vzdialenosť čelustí
L4	Počiatočná merná dĺžka
tan δ	Stratový činiteľ

σ_m	Medza pevnosti v ťahu
ε	Pomerné predĺženie
E	Modul pružnosti v ťahu
E'	Elastický modul pružnosti
DOW	Americký výrobca polymérnych materiálov
ZWICK	Nemecký výrobca skúšobných zariadení

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Štruktúrny vzorec PE.....	16
Obr. 2 Technické PE výlisky pre strojársky a elektrotechnický priemysel	24
Obr. 3 Deštrukcia kompozitov so sférickými	27
Obr. 4 Vplyv veľkosti častíc plniva na pevnosť	27
Obr. 5 Reaktívne a nereaktívne modifikátory.....	29
Obr. 6 Vplyv typu modifikátora na vlastnosti PP.....	30
Obr. 7 Schéma štruktúry montmorillonitu.....	31
Obr. 8 Štruktúra vrstevnatých silikátov	32
Obr. 9 Schéma štruktúry grafénových vrstiev a jednostenných	32
Obr. 10 Schéma funkcionalizácie uhlíkových nanorúrok.....	33
Obr. 11 Ručný vyhrievaný lis.....	40
Obr. 12 Tvar skúšobného telieska – typ 5	40
Obr. 13 Vytlačovací stroj Scientific LE45-30/CV.....	41
Obr. 14 Viacúčelové meracie zariadenie DMA 1	42
Obr. 15 Univerzálny skúšobný stroj Zwick 1456.....	43
Obr. 16 Schéma kapilárneho vytlačovacieho plastometra.....	44
Obr. 17 Porovnanie medzi pevnosti v ťahu pri HDPE s 3% obsahom MAPE.....	46
Obr. 18 Porovnanie medzi pevnosti v ťahu pri HDPE s 7% obsahom MAPE.....	47
Obr. 19 Porovnanie medzi pevnosti v ťahu pri HDPE s 15% obsahom MAPE.....	48
Obr. 20 Porovnanie predĺženia pri pretrhnutí pri HDPE s 3% obsahom MAPE.....	49
Obr. 21 Porovnanie predĺženia pri pretrhnutí pri HDPE s 7% obsahom MAPE.....	50
Obr. 22 Porovnanie predĺženia pri pretrhnutí pri HDPE s 15% obsahom MAPE.....	51
Obr. 23 Porovnanie modulu pružnosti pri HDPE s 3% obsahom MAPE.....	52
Obr. 24 Porovnanie modulu pružnosti pri HDPE s 7% obsahom MAPE.....	53
Obr. 25 Porovnanie modulu pružnosti pri HDPE s 15% obsahom MAPE.....	54
Obr. 26 Závislosť elastického modulu pružnosti na frekvenciu pri 3% obsahu MAPE.....	55
Obr. 27 Závislosť elastického modulu pružnosti na frekvenciu pri 7% obsahu MAPE.....	56
Obr. 28 Závislosť elastického modulu pružnosti na frekvenciu pri 15% obsahu	56
Obr. 29 Závislosť stratového uhla na frekvenciu pri 3% obsahu MAPE	57
Obr. 30 Závislosť stratového uhla na frekvenciu pri 7% obsahu MAPE	58
Obr. 31 Závislosť stratového uhla na frekvenciu pri 15% obsahu MAPE	58
Obr. 32 Grafické porovnanie hmotností vytlačených odrezkov	60

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Rozdelenie jednotlivých druhov polyetylénov	16
Tab. 2 Vybrané vlastnosti polymérov	24
Tab. 3 Vybrané vlastnosti DOW HDPE 25055E.....	27
Tab. 4 Vybrané vlastnosti maltenizovaného polyetylénu PRIEX 12031	38
Tab. 5 Vybrané vlastnosti oxidu titaničitého	29
Tab. 6 Vybrané vlastnosti uhličitanu vápenatého	30
Tab. 7 Technické parametre vytlačovacieho stroja Scientific LE45-30/CV	31
Tab. 8 Technické parametre prístroja METTLER TOLEDO DMA 1	32
Tab. 9 Technické parametre univerzálneho skúšobného prístroja Zwick 1456	32
Tab. 10 Označenie a množstvo jednotlivých plnív a kompatibilizátora.....	45
Tab. 11 Namerané hodnoty medzi pevnosti v ťahu pri 3% obsahu MAPE.....	40
Tab. 12 Namerané hodnoty medzi pevnosti v ťahu pri 7% obsahu MAPE.....	40
Tab. 13 Namerané hodnoty medzi pevnosti v ťahu pri 15% obsahu MAPE.....	41
Tab. 14 Namerané hodnoty predĺženia pri pretrhnutí pri 3% obsahu MAPE.....	42
Tab. 15 Namerané hodnoty predĺženia pri pretrhnutí pri 7% obsahu MAPE.....	43
Tab. 16 Namerané hodnoty predĺženia pri pretrhnutí pri 15% obsahu MAPE.....	51
Tab. 17 Namerané hodnoty modulu pružnosti pri 3% obsahu MAPE	52
Tab. 18 Namerané hodnoty modulu pružnosti pri 7% obsahu MAPE	53
Tab. 19 Namerané hodnoty modulu pružnosti pri 15% obsahu MAPE	54
Tab. 20 Namerané hodnoty hmotností vzoriek pri meraní indexu toku taveniny	59

ZOZNAM PRÍLOH

CD médium – diplomová práca v elektronickej podobe