

Možnosti využití PUR odpadu jako plniva v polymerní matrici

Bc. Tomáš Solařík

Diplomová práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Tomáš Solařík
Osobní číslo:	T20113
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Specializace:	Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Možnosti využití PUR odpadu jako plniva v polymerní matici

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte rešerši na dané téma, jak v časopisech, tak i případně v patentech
2. Na základě získaných informací ohledně materiálů a sledovaných vlastností navrhnete a připravte zkontrovanou kompozitu a proměřte jejich vlastnosti vhodnými metodami
3. Stanovte míru souhlasu s reálnými výrobky a možnost aplikace připravených kompozitů.

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

Seznam doporučené literatury:

Thomas Sabu, Polymer composites, Weinheim : Wiley-VCH, c2012-2014, ISBN 9783527329854

Kozlov, Georgij Vladimirovič (Editor), Mikitajev, Abdulach Kasbulatovič, 1942- (Editor), Zaikov, Gennadij Jefremovič, 1935- (Editor), Polymer and composites theory and practical applications, New York : Nova Science Publishers, c2011, ISBN 9781617610370

články v impaktovaných časopisech na dané téma

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Dagmar Měřinská, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 18. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou 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;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou 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);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta: Tomáš Solařík

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití polyuretanového odpadu jako plniva v polymerní matrici. Nejen u polyuretanu, ale u všech plastů platí, že se zvyšující se spotřebou narůstá také množství odpadů, které po výrobcích zůstanou. Hledání možností, jak využít odpad, pokud nelze přistoupit ke klasickým recyklačním metodám, může být společnosti velmi přínosné. Cílem této práce bylo navrhnout a připravit dané kompozity, proměřit jejich vlastnosti vhodnými metodami, stanovit míru souhlasu s reálnými výrobky a navrhnout možnosti aplikace připravených kompozitů. Vyhodnocení proběhlo na základě výsledků jednotlivých měření pro dané kompozity, konkrétně: zkouška tahem, infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací a měření přenosového útlumu. Výsledky této práce ukazují, že polyuretanový odpad lze použít jako plnivo v polymerní matrici, přičemž ale záleží na koncentraci plniva a na výrobku, který má být vyroben. V závěru jsou formulovány návrhy pro výrobce, které poukazují na polyuretanový odpad jako na plnivo, které zlevňuje výrobu, a že se podle experimentu v této práci nejedná o plnivo, které by do značné míry zlepšovalo mechanické vlastnosti.

Klíčová slova: kompozity, polyuretan, odpad, LDPE, HDPE, ABS, analýza vlastností materiálu

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the possibilities of polyurethane waste usage as a filler in the polymer matrix. With an increasing consumption the amount of waste that remains after the products also grows. This applies not only to polyurethane, but also in case of all plastics as well. Finding investigating methods to utilize waste, if conventional recycling methods cannot be used, can be very beneficial for society. The aim of this work was to design and prepare the composites, measure their properties by appropriate methods, determine the degree of agreement with the real products and the possibility of prepared composites applications. The evaluation was based on the results of individual measurements for the given composites, specifically: tensile test, Fourier transform infrared spectroscopy and transfer damping. The results of the work show that polyurethane waste can be used as a

filler in a polymer matrix, but it depends on the concentration of the filler and the product which is to be produced. As a conclusion, it provides proposals for the producers considering polyurethane waste as a filler reducing the production cost and emphasizes the fact that, according to the experiment, polyurethane appears to improve mechanical properties only insignificantly.

Keywords: composites, polyurethane, waste, LDPE, HDPE, ABS, material properties analysis

Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Dagmar Měřinské, Ph.D. za cenné rady, ochotu a čas, který mi během vypracování diplomové práce a studia věnovala. Dále děkuji Aloisi Šťastnému za pomoc při přípravě praktické části diplomové práce a doc. Ing. Martinu Vašinovi, Ph.D. za čas a zkušenosti, které mi předal při vyhodnocování měření přenosového útlumu. Největší poděkování patří mé rodině, která mě od začátku studia podporovala.

„Kuráž je dobrá. Vytrvalost lepší.“

Jean De La Fontaine

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

OBSAH

ÚVOD	11
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	13
1.1 VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	13
1.2 SLOŽENÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	14
1.2.1 Matrice	14
1.2.2 Výztuž	16
1.3 NANOKOMPOZITY	19
1.3.1 Vlastnosti nanokompozitů.....	19
1.3.2 Rozdělení nanokompozitů.....	19
1.3.3 Použití nanokompozitů.....	20
2 POLYOLEFINY A ABS	21
2.1 POLYOLEFINY.....	22
2.1.1 Polyetylen.....	22
2.2 STYRENOVÉ POLYMERY	25
2.2.1 ABS – Akrylonitrilbutadienstyren	26
3 PUR A ZPRACOVÁNÍ JEHO ODPADU	28
3.1 SYNTÉZA PRVKŮ ZA VZNIKU PUR.....	28
3.1.1 Polyoly	28
3.1.2 Izokyanáty	28
3.1.3 Extendery	29
3.1.4 Katalyzátory	29
3.2 VLASTNOSTI, TYPY A POUŽITÍ PUR.....	29
3.2.1 Lehčené hmoty	30
3.2.2 Lepidla.....	30
3.2.3 Vlákna a filmy z lineárních polyuretanů	31
3.2.4 Polyuretanové elastomery	31
3.2.5 Polyuretanové licí pryskyřice.....	31
3.2.6 Polyuretanové nátěrové hmoty.....	31
3.3 ZPRACOVÁNÍ A RECYKLACE PUR ODPADU.....	31
3.3.1 Mechanická recyklace	32
3.3.2 Chemická recyklace	33
3.3.3 Rekuperace energie	34
4 ZPRACOVÁNÍ POLYMERNÍCH SMĚSÍ	35
4.1 HNĚTENÍ.....	35
4.2 LISOVÁNÍ	35
5 METODY VYHODNOCENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ	36

5.1	ZKOUŠKA TAHEM	36
5.2	FTIR (INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ).....	38
5.3	MĚŘENÍ PŘENOSOVÉHO ÚTLUMU	40
6	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	43
7	PŘÍPRAVA EXPERIMENTU	44
7.1	VOLBA POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ, PLNIVA A KONCENTRACÍ	44
7.2	VÝROBA VZORKŮ	45
7.2.1	Hnětení	45
7.2.2	Lisování v horkém lisu.....	46
7.2.3	Lisování ve studeném lisu	47
7.2.4	Vyseknutí vzorků	48
8	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	49
8.1	ZKOUŠKA TAHEM	49
8.1.1	Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – ABS.....	50
8.1.2	Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – LDPE	51
8.1.3	Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – HDPE	52
8.1.4	Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-HDPE	53
8.1.5	Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-LDPE.....	54
8.1.6	Vliv maleinizace na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-HDPE	55
8.1.7	Vliv maleinizace na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-LDPE.....	56
8.1.8	Shrnutí výsledků tahové zkoušky.....	57
8.2	VLIV TEPLOTNÍHO ZATÍŽENÍ	58
8.2.1	Vliv teplotního zatížení na chemické změny – ABS	59
8.2.2	Vliv teplotního zatížení na chemické změny – LDPE	60
8.2.3	Vliv teplotního zatížení na chemické změny – HDPE.....	61
8.2.4	Vliv teplotního zatížení na chemické změny – m-LDPE.....	63
8.2.5	Vliv teplotního zatížení na chemické změny – m-HDPE	65
8.2.6	Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – ABS.....	66
8.2.7	Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – LDPE.....	67
8.2.8	Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – HDPE	68
8.2.9	Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-LDPE	69
8.2.10	Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-HDPE.....	70
8.2.11	Shrnutí výsledků zkoušek teplotního zatížení.....	71
8.3	MĚŘENÍ REZONANČNÍ FREKVENCE	72
8.3.1	Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – ABS.....	74
8.3.2	Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – LDPE.....	74

8.3.3	Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – HDPE	75
8.3.4	Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – m-LDPE	76
8.3.5	Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – m-HDPE.....	77
8.3.6	Shrnutí výsledků měření rezonanční frekvence	77
9	EKONOMICKÝ ROZBOR A MOŽNOSTI APLIKACE.....	78
9.1	CENOVÝ VÝPOČET.....	78
9.2	MOŽNOSTI APLIKACE	81
ZÁVĚR		83
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		85
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		89
SEZNAM OBRÁZKŮ		90
SEZNAM TABULEK.....		93
SEZNAM PŘÍLOH.....		94

ÚVOD

Výrobní průmysl se rok od roku rozrůstá, a s tím i spotřeba materiálu. Oproti 20. století je tento rozdíl obrovský a není tedy divu, že se moderní společnost čím dál více zabývá otázkou recyklace a znovuvyužitím odpadů.

Tato práce se zabývá možnostmi využití polyuretanového odpadu v polymerní matrici. V současné době nachází polyuretanový odpad využití při rekuperaci energie (spalování), chemické recyklaci (získáváme zpět monomery, popř. oligomery) a při mechanické recyklaci. Ne vždy je spalování a chemická recyklace nejlepší řešení, a právě proto je tato práce spjata s využitím odpadů zpracovaných mechanickým způsobem.

Cílem této práce je zjistit, jaké vlastnosti budou vykazovat kompozity tvořené polyuretanovým odpadem ve spojení s akrylonitrilbutadienstyrenem (ABS), nízkohustotním polyetylenem (LDPE), vysokohustotním polyetylenem (HDPE) a maleinizovaným polyetylenem v různých koncentracích. Součástí je také ekonomická rozvaha a uvedení, jaké jsou možnosti aplikace takto vytvořených kompozitů.

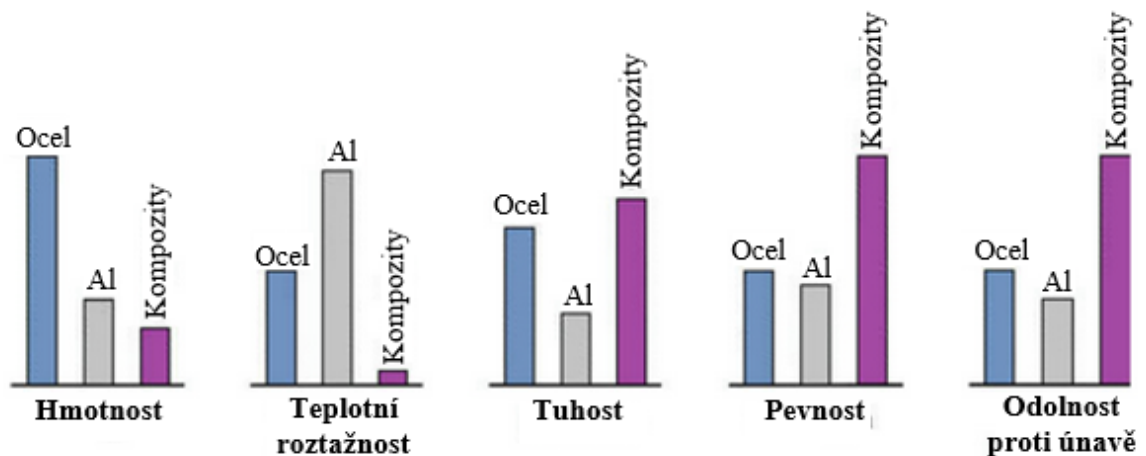
Praktická část této práce se sestává ze zkoušky tahem, teplotního zatížení a zkoušky přenosového útlumu. Poznatky z těchto měření jsou vždy shrnuty tak, aby co nejlépe předávaly informace o výsledku dané zkoušky, popřípadě poukázaly na jednotlivé závislosti.

Tato práce má obecně informovat o faktech získaných z měření, nikoliv o tom, jak má být daný kompozit vytvořen nejlépe. Pokud by měl výrobce zájem produkovat výrobky s polyuretanovým odpadem jako plnivem, sám si podle dat získaných z měření určí, která koncentrace plniva odpovídá požadovanému standardu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozity tvoří po ocelích jednu z nejrozsáhlejších a nejdůležitějších skupin technických materiálů. Jedním z důvodů je, že kompozity nabízí velmi atraktivní kombinace vlastností jako např. tuhost, houževnatost, lehkost a odolnost proti korozi. Všestrannost těchto materiálů je využitelná v mnoha odvětvích, ale vyžaduje porozumění v dané problematice, mají-li být správně využity. Kompozitní materiály jsou složeny ze dvou nebo více odlišných složek (fází). V mnoha případech je přítomna tuhá složka, často v podlouhlém tvaru, zapuštěna do měkčí a poddajnější složky, tvořící matrici. Mezi nejzákladnější typy kompozitních materiálů patří kompozity vláknové a částicové. [1]



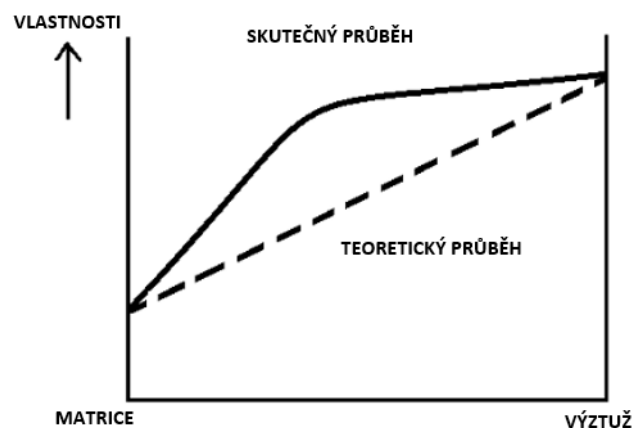
Obr. 1 Porovnání mezi konvenčními monolitickými materiály a kompozitními materiály [2]

1.1 Vlastnosti kompozitních materiálů

Na vlastnosti kompozitních materiálů mají vliv nejen vlastnosti jednotlivých komponent (matrice, výztuž), ale také jejich koncentrace, interakce mezi složkami aj. Zvyšováním obsahu vyztužující složky dochází ke zlepšení mechanických vlastností, a to až do 80% podílu výztuže. Jednou z podmínek zlepšení vlastností je dokonalé smočení výztuže matricí, což zároveň vede k silné adhezi plnicí složky a pojiva. Takto můžeme předpokládat dokonalý přenos silového zatížení z matrice na výztuž. Na vlastnosti má značný vliv i orientace plnicího systému.

Běžné technické materiály mají izotropní charakter (vlastnosti nejsou závislé na směru), nebo vykazují velmi malou anizotropii. Naproti tomu pro kompozitní materiály je typické, že široká škála z nich je silně anizotropní (vlastnosti se v různých směrech liší). Kompozit s termoplastickou matricí a uspořádanou výztuží ze skleněných vláken má řádově jinou pevnost/tuhost ve směru vláken a kolmo na ně.

Další charakteristikou kompozitních materiálů je synergický efekt. Jedná se o efekt, kdy dochází v kompozitu ke kombinaci pozitivních vlastností jeho složek tak, že celek přesahuje poměrný součet složek. Je tedy snahou připravit kompozitní materiál tak, aby byl synergický efekt co nejsilnější. Příkladem je kompozit obsahující křehká vlákna uložená v křehké matrici – takový kompozit vykazuje dobrou odolnost proti křehkému lomu. Kompozit tedy dosahuje lepších vlastností, než by odpovídalo průměru vlastností z jednotlivých složek. [3,4,8]



Obr. 2 Synergický efekt v kompozitním materiálu [3]

1.2 Složení kompozitních materiálů

Mezi základní složky kompozitních materiálů patří matrice (pojivo) a výztuž (plnivo). V dnešní době je nespočet různých druhů matic a plniv, přičemž jednotlivé typy mají své využití a lze je mezi sebou různě kombinovat.

1.2.1 Matrice

Matrice je materiál, kterým je prosycena výztuž (ať už vlákna nebo částice) tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Hlavním úkolem matrice je spojit výztuž a chránit ji před různými vlivy, aby zaručila zachování geometrického tvaru a zavedení a přenos sil. Matrice musí splňovat podmínku vhodné viskozity a povrchového napětí, aby vyztužující fázi dokonale smočilo. [4]

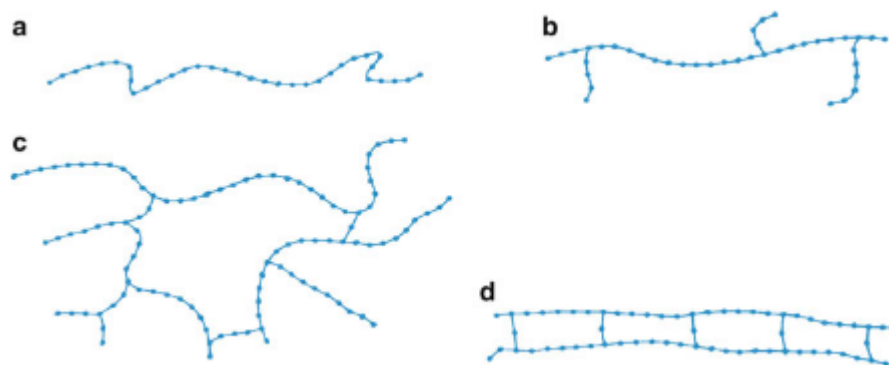
Kompozity dle použité matrice dělíme na kompozity:

- a) s kovovou matricí;
- b) s keramickou matricí;
- c) s polymerní matricí;

- d) s uhlíkovou maticí;
- e) se skleněnou maticí.

- **Polymerní matrice**

Polymery jsou jako matrice strukturně mnohem více komplexní než kovy a keramika. Jsou levné a mohou být snadno zpracovatelné. Nevýhodou však je, že polymery mají menší pevnost, modul a nižší teplotní limit. Dlouhodobé vystavení ultrafialovému (UV) záření, popř. rozpouštědlům může vést k degradaci vlastností polymerní matrice. Kvůli převážně kovalentním vazbám jsou polymery špatné vodiče tepla a elektřiny. Na druhou stranu jsou polymery obecně více odolné vůči chemikáliím v porovnání s ocelí. Podle chování rozdělujeme dvě hlavní třídy polymerů, a to termosetické nebo termoplastické polymery. Termosety podléhají tzv. vytvrzovací reakci, což znamená zesíťování polymerních řetězců. Vytvrzovací proces může být iniciován vhodnými chemickými prostředky, aplikací vysoké teploty a tlaku nebo vystavení monomeru paprskům elektronů. Termoplasty jsou polymery, které tečou působením tepla a tlaku – jinak řečeno měknou a taví se. Ochlazením na teplotu okolí termoplasty přecházejí zpět do pevného stavu. Jejich rozdílné vlastnosti a chování vyplývají např. z jejich molekulární struktury a tvaru, molekulové hmotnosti nebo množství a typů vazeb. Základní molekulová struktura z hlediska konfigurací řetězových molekul je znázorněna na *Obr. 3*. [2,4]



Obr. 3 Různé konfigurace molekulárního řetězce: a) lineární, b) rozvětvený, c) zesíťovaný, d) žebříkový [2]

- a) Lineární – Sestává se z dlouhého řetězce atomů s připojenými postranními skupinami. Příkladem polymerů s tímto typem řetězce je například HDPE, polyvinylchlorid (PVC) a polymetylmetakrylát (PMMA).
- b) Rozvětvený – K rozvětvení může dojít u lineárního, zesíťovaného nebo jakéhokoliv jiného typu polymeru. Příkladem je LDPE.

- c) Zesíťovaný – V tomto případě jsou molekuly jednoho řetězce vázány s molekulami jiného řetězce. Zesíťování vede k tvorbě trojrozměrné sítě a ztěžuje klouzání molekul kolem sebe, tím pádem jsou takové polymery pevné a tuhé. Příkladem je pryž.
- d) Žebříkový – Pokud máme dva lineární polymery spojené pravidelně mezi sebou, získáme žebříkový polymer. Není překvapením, že takové polymery jsou tužší než lineární polymery. Příkladem je dianhydrid naftalenetetrakarboxylové kyseliny (NTDA).

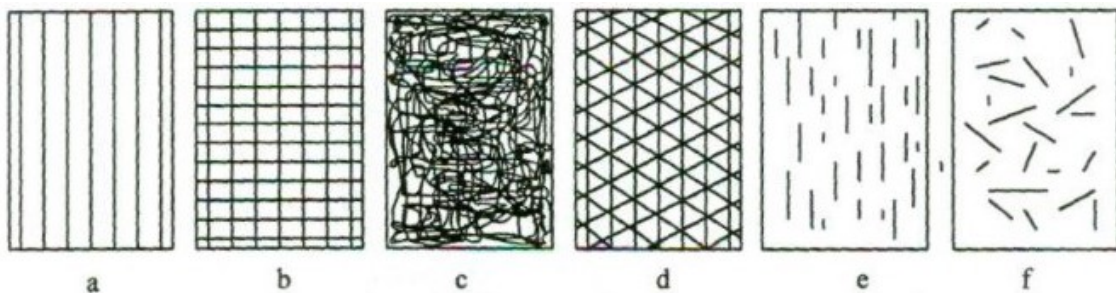
Mezi běžné termosety používané jako matrice patří epoxidové pryskyřice, fenolické pryskyřice, polyestery nebo polyimidy. Termoplastické matrice pak zastupují polymery jako jsou LDPE/HDPE, polypropylen (PP), polyetylentereftalát (PET) nebo ABS. [2]

1.2.2 Výztuž

Výztuže kompozitních materiálu lze rozdělit do dvou základních kategorií, a to vláknové a částicové. Vláknové kompozity dále dělíme na dlouhovláknové a krátkovláknové. Částicové kompozity pak s náhodnou nebo přednostní orientací. [5]

- **Vláknová výztuž**

Výztuž vláknových kompozitů tvoří vlákna o vysokém modulu pružnosti (vysokomodulová vlákna), mající za následek tuhost kompozitu, nebo o vysoké pevnosti (vysokopevnostní vlákna) zajišťující vysokou pevnost kompozitu. Pro vlákna je charakteristické, že pevnost v tahu podél osy je znatelně vyšší, než je pevnost stejného kompaktního materiálu. Dlouhá vlákna uspořádaná v jednom směru vykazují vysoké hodnoty pevnosti a tuhosti kompozitu ve směru vláken, ale malé hodnoty stejných veličin směrem kolmo na vlákna – jedná se tedy o tzv. anizotropii vlastností. Chceme-li vytvořit kompozit izotropní, je nutno vlákna v kompozitu uložit v různých směrech, viz *Obr. 4*. [4,6]



Obr. 4 Uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá, e) krátká vlákna jednosměrně orientována, f) krátká vlákna nahodile orientována [6]

Pro pevnost kompozitních materiálu mají značný vliv defekty vláken, které ji snižují. Pevnost vláken roste se zmenšujícím se průřezem, proto zmenšují právě zmíněné přirozené defekty. Průřez kruhových vláken se proto pohybuje v rozmezí od 5 do 20 μm . Při porovnání vláken a kompaktních materiálů je tedy zřejmé, že vlákna mají větší pevnost ve směru délky, protože nečistoty jsou ve struktuře vlákna minimalizovány v důsledku jeho malého průřezu. [5]

Tab. 1 Porovnání mechanických parametrů vybraných druhů vláken s parametry stejného, ale kompaktního materiálu [5]

Materiál	Modul pružnosti [GPa]		Pevnost v tahu [GPa]	
	Vlákno	Kompaktní materiál	Vlákno	Kompaktní materiál
Sklo typu E	72	72	2,1 až 3,5	0,1
Uhlík	190 až 850	10	2,0 až 7,0	0,2
SiC keramika	400	400	3,9	0,5

Vlákna lze rozdělit na následující skupiny:

- a) přírodní vlákna;
- b) skleněná vlákna;
- c) uhlíková a grafitová vlákna;
- d) aramidová a silonová vlákna;
- e) keramická vlákna;
- f) kovová vlákna;
- g) whiskery.[3]

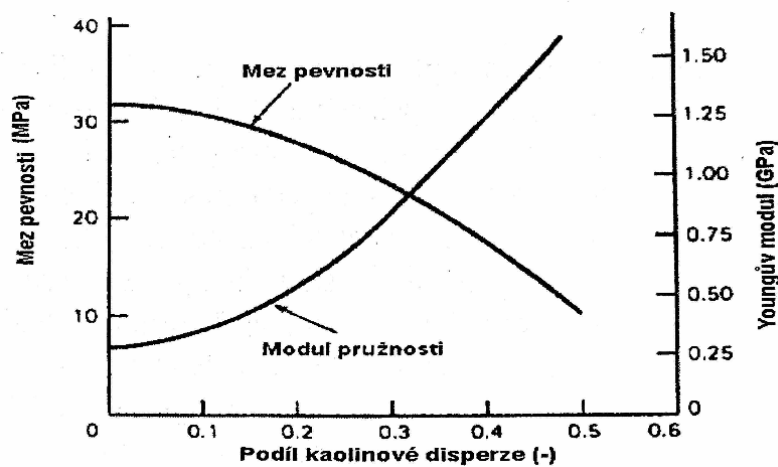
- **Částicová výztuž**

Částicové kompozity jsou takové, jejichž výztuži jsou nevláknité částice a jejich rozměry se ve všech směrech příliš neliší. Částice mohou mít tvar kulový, čtyřstěnný, krychlový či jiný těmto podobný. Zapracování částic (jíl, běloba, slída, křemenná moučka, keramické částice aj.) do plastové matrice může zlepšit mechanické vlastnosti (tvrdost, odolnost proti opotřebení). Častěji se však jedná o zlepšení nebo úpravu vlastností jako tepelná odolnost,

elektrická vodivost, útlum vibrací apod. Téměř všechna plniva zvyšují tuhost matrice, ale snižují její houževnatost. Některá plniva zlepšují i další vlastnosti, ale hlavně snižují cenu výrobku. [5]

Částice v polymerní matrici by měly být rozloženy zcela rovnoměrně. Shlukování částic plniva na hranicích zrn matrice při jejím tuhnutí je nežádoucí efekt. Při výrobě takových kompozitů je tedy důležité intenzivní míchání při přidávání částic disperze do taveniny. Při nevhodném prostorovém uspořádání může dojít ke vzniku pórů, a to již od 50% podílu disperze. Nad 74 % disperze již není možné pórovitosti zabránit. [3,7]

Částice plniva v polymerní matrici přestávají mít zpevňující vliv zpravidla při rozměrech od 10 až do 100 μm . Částice nad 10 μm pak v kompozitu přestávají hrát roli zpevňujících center, ale naopak se z nich stávají koncentrátoři napětí a snižují tím jeho pevnost. Částice proto především zvyšují tuhost kompozitu až o jeden řád, mez kluzu nebo mez pružnosti však nezvyšují, kdežto u meze pevnosti často dochází ke snížení. To lze vidět na obrázku Obr. 5. [3,5]



Obr. 5 Částicový kompozit s plastovou matricí. Ekviaxiální částice kaolinu v polyetylenové matrici [3]

Příklady částicových kompozitů:

- polystyren a celulózové částice (piliny) – antivibrační hmota;
- polyetylen a 70-80 % olověného prášku – ochrana proti RTG a gama záření;
- polyamid s více než 20 % niklových částic – dobrá tepelná i elektrická vodivost. [3,5]

1.3 Nanokompozity

Nanokompozity jsou heterogenní/hybridní materiály, které jsou vytvořeny kombinací směsí polymerů s anorganickými pevnými látkami v nanometrickém měřítku (jednoduše nanočástice nebo nanoplivo). Aby se mohl kompozitní materiál považovat za nanokompozit, musí jeho částice mít rozměry v rozmezí 10-100 nm. Nanočástice lze klasifikovat jako kovové nanočástice, nekovové keramické nebo minerální nanočástice, polovodičové a uhlíkové nanočástice. [10]

1.3.1 Vlastnosti nanokompozitů

Nanočástice mají různé fyzikální a chemické vlastnosti na atomární úrovni právě díky jejich malé velikosti a velkému poměru povrchu k objemu. Vlastnosti nanokompozitů jsou pak dány nejen složením, ale i velikostí částic, jejich uspořádáním a strukturou. Vlastnosti, kde prokázaly nanočástice značné zlepšení, jsou:

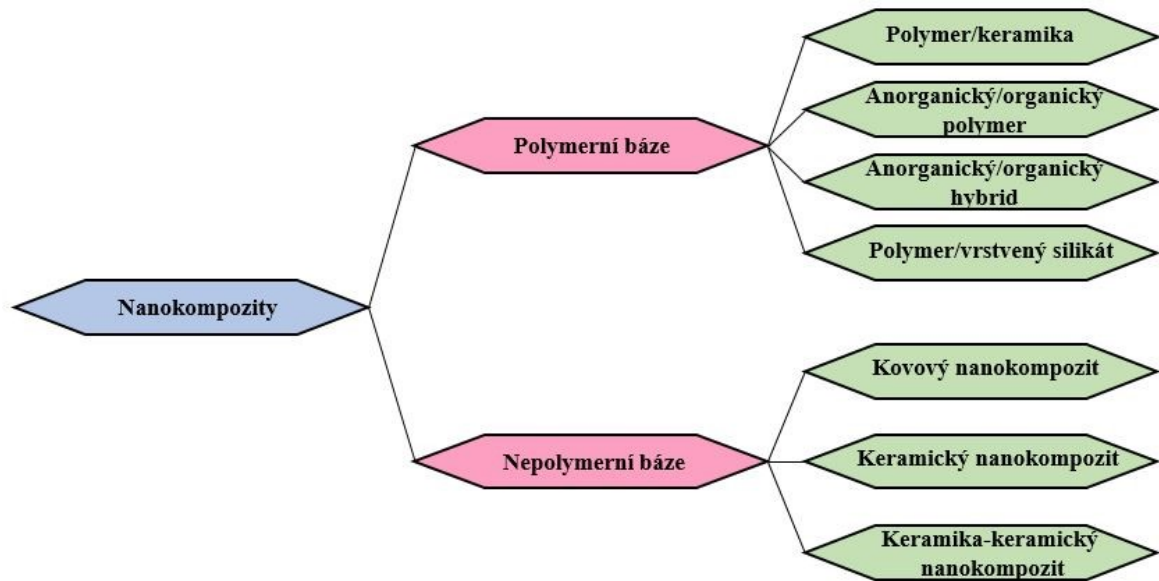
- mechanické vlastnosti (pevnost, odolnost proti opotřebení aj.);
- tepelná stabilita;
- propustnost plynů, vody a rozpouštědel;
- vzhled povrchu;
- elektrická vodivost;
- chemická odolnost.

Potenciální riziko nanokompozitů se vyskytuje převážně v oblastech:

- zdraví a životního prostředí;
- molekulárně výrobního průmyslu. [9,10]

1.3.2 Rozdělení nanokompozitů

Nanokompozity lze klasifikovat na základě přítomnosti nebo nepřítomnosti polymerního materiálu v daném kompozitu. Nanokompozity, které neobsahují žádné polymery, popřípadě materiály z nich odvozené, se nazývají jako nanokompozity na nepolymerní bázi – běžně zaužívané jako anorganické nanokompozity. [10]



Obr. 6 Rozdělení nanokompozitů podle polymerní/nepolymerní báze [10]

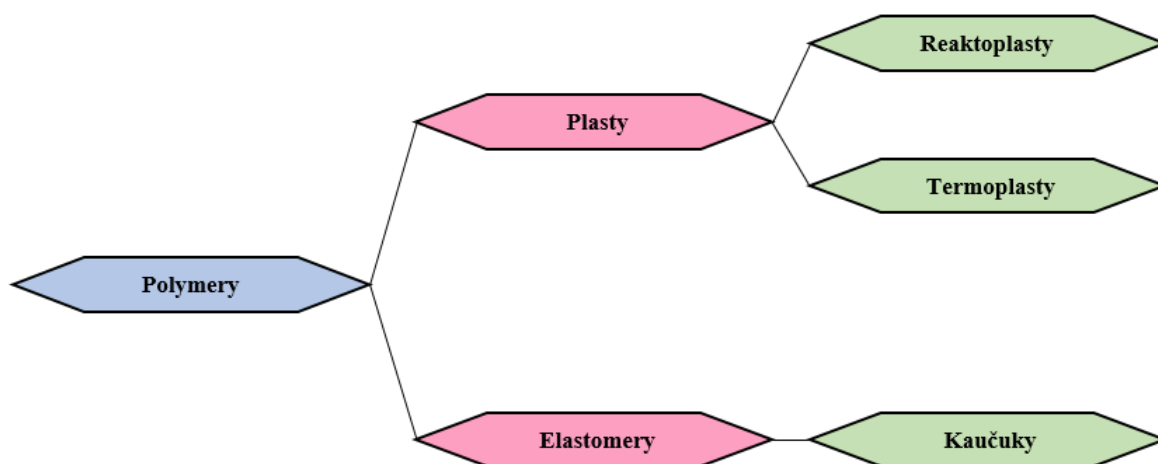
1.3.3 Použití nanokompozitů

Nanokompozity se díky svým vlastnostem rychle uchytily v praxi a jejich vývoj jde neustále vpřed. Očekává se, že během deseti let stoupne produkce nanokompozitních materiálů v různých oblastech průmyslu na bezmála 600 tisíc tun za rok. Použití nanokompozitů:

- vysoce pevná vlákna;
- UV ochranné materiály;
- potravinářský průmysl;
- ochrana proti chemikáliím a plynům;
- sportovní a automobilový průmysl;
- povlaky. [9,10]

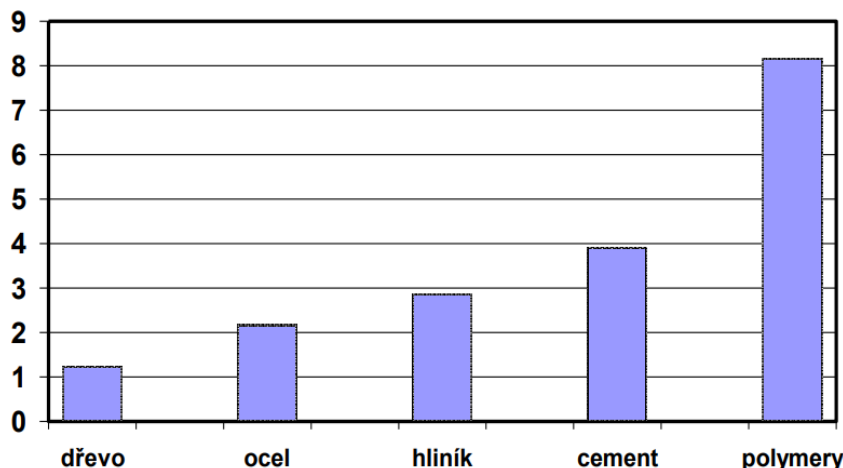
2 POLYOLEFINY A ABS

V historii je zvykem označovat jednotlivé epochy lidstva podle charakteristického materiálu, který člověk využíval nejvíce. Proto není divu, že někteří lidé označují dnešní dobu jako dobu polymerní. Polymery jsou chemické látky, které se skládají z obrovských molekul, obsahujících převážně atomy uhlíku, vodíku a kyslíku, často dusíku, chloru či jiných prvků. Polymery mohou být buď v tuhém stavu (výrobek) nebo v podstatě kapalném (při zpracování za vysoké teploty a tlaku). Právě díky možnosti tvářet polymerní materiály můžeme v dnešní době vyrábět výrobky různých tvarů a velikostí. Polymery dělíme na elastomery a plasty, tak jako ukazuje *Obr. 7*. [11]



Obr. 7 Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [11]

Plasty lze tedy popsat jako polymery, které jsou za běžných podmínek většinou tvrdé, často i křehké. Při působení vyšší teploty se stávají plastickými a lze je tvářet. Pokud lze změnu z plastického stavu do tuhého stavu opakovat, bavíme se o termoplastech. Pokud se jedná o změnu nevratnou (trvalou), mluvíme o reaktoplastech. Průměrná světová roční spotřeba polymerů na osobu k roku 2011 činí ± 30 kg, přičemž Evropané a Japonci spotřebují až 90 kg, obyvatelé USA 80 kg, zatímco Číňané 30 kg a Indové pouze 8 kg. Drtivá většina polymerů ze současné produkce jsou polymery syntetické. Úplně první průmyslově zpracovávané polymery jsou však přírodní, konkrétně kaučuky. *Obr. 8* ukazuje index růstu světové spotřeby polymerů za 40-leté období. [11]



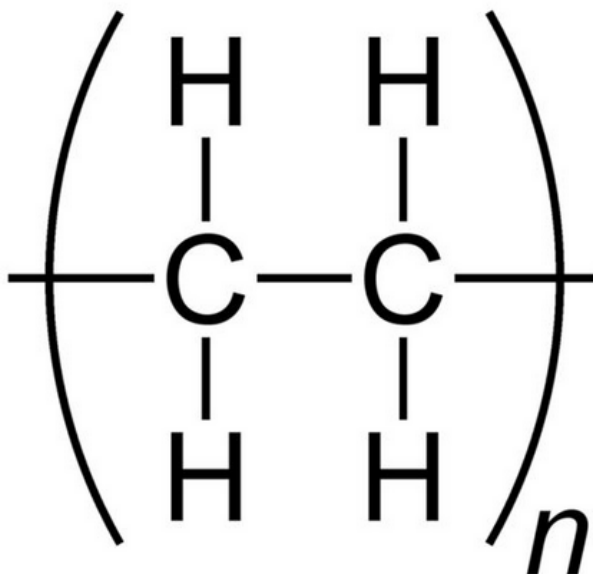
Obr. 8 Porovnání indexu růstu světové spotřeby některých materiálů v letech 1970-2010 [11]

2.1 Polyolefiny

Polyolefiny zastupují jednu z nejdůležitějších skupin polymerních materiálů, a to z důvodu jejich globálního zpracování a použití ve velkém množství. Jsou využívány zejména pro jejich specifické vlastnosti, dobrou zpracovatelnost a nízké náklady. Pod pojmem polyolefiny rozumíme homopolymery a kopolymery olefinů – alkenů (jejich vzorec lze vyjádřit vzorcem C_nH_{2n} , kde n je počet atomů uhlíku v molekule), které obsahují ve svých molekulách jednu dvojnou vazbu. Názvy polyolefinů jsou odvozeny od názvu výchozího monomeru (např. polyetylen) a jedná se o semikrystalické termoplasty. Mezi nejznámější zástupce patří homopolymery a kopolymery etylenu (ethenu), propylenu (propenu) a homopolymer 1-butenu. [11,12]

2.1.1 Polyetylen

Polyetylen (PE) je semikrystalický termoplast, jehož základní strukturu tvoří uhlovodíkový řetězec, který nenesé žádné substituenty. Jedná se o nepolární polymer, protože neobsahuje heteroatom (za heteroatom lze považovat jakékoliv jiné atomy než C a H), což způsobuje, že je PE odolný vůči vodě a polárním rozpouštědlům. Vlastnosti PE jsou ve velké míře závislé na molekulové hmotnosti, prostorovém uspořádání merů v daném řetězci a stupni krystalinity. Ty zase závisejí především na způsobu výroby PE, které se liší podle typu vyráběného PE. [11,13]



Obr. 9 Strukturální vzorec PE [13]

PE s různým stupněm krystalinity se liší hustotou, což je kritérium (společně s charakterizací tvaru řetězce – tj. míra linearity), které se stalo základem pro třídění PE. Dříve se totiž PE rozlišoval podle výroby na nízkotlaký a vysokotlaký. Toto dělení se postupem času ukázalo jako nepraktické z toho důvodu, že se podařilo připravit polymery s vlastnostmi původních nízkotlakých i za použití vysokého tlaku a naopak. Z tohoto důvodu se začala používat klasifikace podle hustoty, která je popsána výše. [11,13]

Mezi obecně známé druhy PE patří:

- ULDPE – PE s velmi nízkou hustotou;
- LDPE – PE s nízkou hustotou;
- LLDPE – lineární PE s nízkou hustotou;
- MDPE – PE se střední hustotou;
- HMW-HDPE – PE s vysokou molekulovou hmotností;
- UHMW-HDPE – PE s ultravysokou molekulovou hmotností. [13]

Mezi obecné charakteristiky PE bez ohledu na zvolený typ patří:

- nízká cena;
- dobrá zpracovatelnost;
- výborná chemická odolnost a elektroizolační vlastnosti;
- zdravotní nezávadnost;

- tuhost a vláčnost při nízkých teplotách;
- nízký bod měknutí;
- sklony k oxidaci;
- zákal materiálů v tlustých vrstvách. [13]

- **LDPE – Polyetylen s nízkou hustotou**

Polyetylen s nízkou hustotou se vyrábí radikálovou polymerací při vysokých teplotách a vysokých tlacích. Z důvodu použitého polymeračního mechanismu má LDPE rozvětvený polymerní řetězec – proto se občas používá název rozvětvený PE místo LDPE. Struktura tohoto řetězce je znázorněna na *Obr. 10*. Taková struktura řetězce zabraňuje pravidelnému uspořádání řetězců, což má za následek nízkou krystalinitu (do 64 %). LDPE je pružný a má nízkou pevnost v tahu a tlaku ve srovnání s HDPE, a to právě kvůli nepravidelnému uspořádání řetězců. S LDPE se můžeme také setkat pod jeho obchodním názvem BRALEN. Obecně se LDPE používá v potravinářství (obaly), pro pevné nádoby, sáčky a fólie. V *Tab. 2* jsou pak uvedeny typické vlastnosti LDPE. [11,13,14]



Obr. 10 Struktura makromolekul LDPE [14]

Tab. 2 Typické vlastnosti LDPE [13]

Vlastnost	LDPE
Hustota [g/cm ³]	0,915-0,935
Teplota tání [°C]	106-112
Pevnost v tahu [MPa]	7-17
Prodloužení při přetržení [%]	100-700
Modul pružnosti [MPa]	415-795
Tvrдость [Shore D]	45-60

- **HDPE – Polyetylen s vysokou hustotou**

Polyetylen s vysokou hustotou se vyrábí třemi základními technologickými postupy – roztokovým, suspenzním a v plynné fázi. Díky použitému polymeračnímu mechanismu je struktura HDPE lineární, a tedy se lze setkat s názvem lineární PE. Struktura tohoto řetězce je znázorněna na *Obr. 11*. Díky malému větvení makromolekul mají dlouhé lineární řetězce možnost se pravidelně uspořádat, což má za následek vysokou krystalinitu (do 93 %). HDPE má ve srovnání s LDPE vyšší tuhost, a to právě kvůli vysokému krystalickému podílu. S HDPE se můžeme setkat pod obchodním názvem LITEN. HDPE se používá na obaly, džbány, láhve na čisticí prostředky, nádoby na odpadky nebo vodovodní potrubí. V *Tab. 3* jsou uvedeny typické vlastnosti HDPE. [11,13,14]



Obr. 11 Struktura makromolekul HDPE [14]

Tab. 3 Typické vlastnosti HDPE [13]

Vlastnost	HDPE
Hustota [g/cm ³]	0,941-0,967
Teplota tání [°C]	130-133
Pevnost v tahu [MPa]	18-30
Prodloužení při přetržení [%]	100-1000
Modul pružnosti [MPa]	689-1654
Tvrдость [Shore D]	60-70

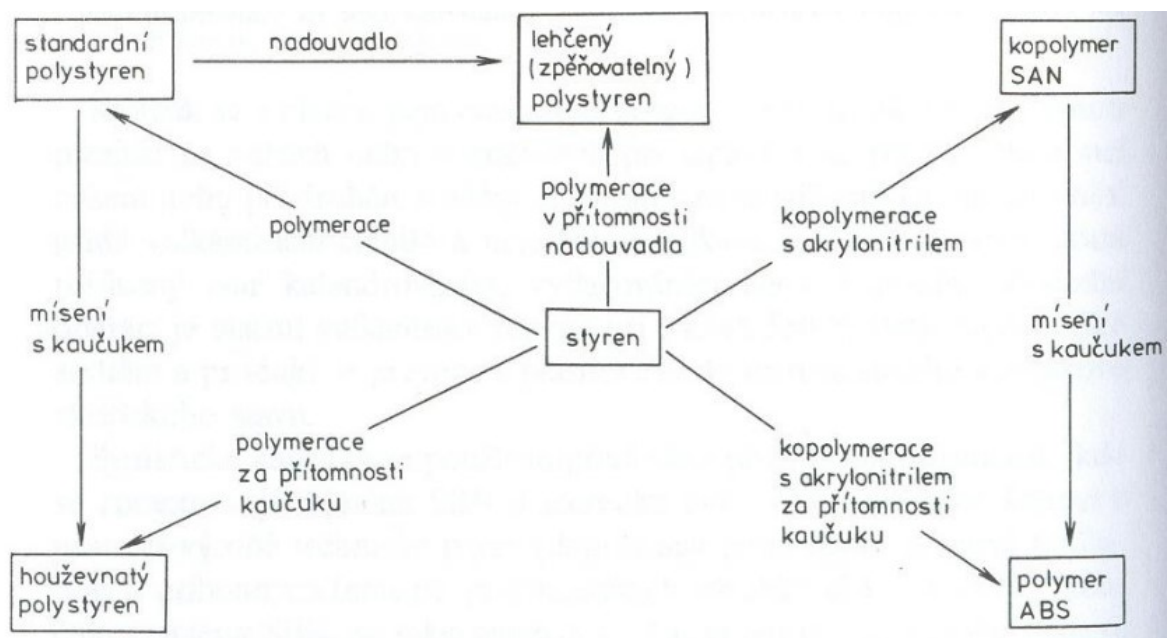
2.2 Styrenové polymery

Styrenové polymery tvoří velkou skupinu makromolekulárních látek, jejichž monomerem je styren. Ve světové produkci jsou styrenové polymery na třetím místě po polyolefinech a polyvinylchloridu. Tuto skupinu plastů lze rozdělit na:

- standardní plasty – resp. homopolymery styrenu se skvělou průhledností a leskem, avšak značně křehké;

- b) zpěňovatelné plasty s podílem nadouvadla pro výrobu lehčených produktů s nízkou hustotou a s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi;
- c) houževnaté plasty se sníženou křehkostí, ale neprůhledné a s nižším leskem;
- d) kopolymery styrenu s akrylonitrilem nebo dalšími monomery, určené pro aplikace vyžadující zvýšenou odolnost vůči teplu, rozpouštědlům nebo mechanickému namáhání;
- e) polymery ABS, resp. houževnaté typy, pro jejichž výrobu je nutno použít monomery butadienu, styrenu a akrylonitrilu. [11,13]

Obr. 12 schematicky znázorňuje přípravu těchto základních typů styrenových plastů.



Obr. 12 Příprava základních skupin styrenových plastů [13]

2.2.1 ABS – Akrylonitrilbutadienstyren

Akrylonitrilbutadienstyren je amorfni terpolymer, což znamená, že se připravuje kombinací tří monomerů: akrylonitril, butadien a styren. Základní podmínkou v praxi je, aby se příprava elastomerního podílu (polybutadien) provedla odděleně, přičemž následuje, pokud možno, dokonalá dispergace v kopolymeru styrenu s akrylonitrilem. Dispergaci lze provést mísením nebo roubováním. Poměr jednotlivých složek se pohybuje v rozmezí 45-70 % styrenu, 10-30 % akrylonitrilu a 15-50 % butadienu. Jednoduše lze ABS chápat jako heterogenní materiál, kde jsou ve spojitě fázi styren-akrylonitrilového kopolymeru rozptýleny malé částice polybutadienového kaučuku. ABS je typický svou houževnatostí, má dobré mechanické vlastnosti, je odolný proti chemikáliím, je tvrdý a má lesklý povrch i bez

dodatečných úprav. ABS je neprůhledný kvůli heterogenosti. Velkou výhodou ABS je, že je dobře zpracovatelný všemi běžnými technologiemi, které u termoplastů používáme, tj. vstřikování, válcování, vyfukování, tvarování za tepla a lisování. Vstřikován je při teplotě 180-250 °C a vytlačován při teplotě 150-215 °C. ABS lze také lepit, svařovat, povrchově upravovat a galvanicky pokovovat. Z cenového hlediska patří mezi levnější konstrukční plasty. Nevýhodou je však povětrnostní stárnutí, proto bez přídavku antioxidantů není vhodný pro venkovní použití. Používá se ve strojírenství, automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, obalové technice, ve spotřebním průmyslu apod. Mezi příklady výrobků z ABS patří stavebnice LEGO, mixéry, vysavače, helmy nebo kryty. Své uplatnění také nachází ve formě kompozitních materiálů (např. 20-40 % skleněné výztuže značně zvyšuje mechanickou pevnost). S ABS se lze setkat pod obchodním názvem FORSAN. [11,13]

3 PUR A ZPRACOVÁNÍ JEHO ODPADU

Polyuretany patří mezi polymerní materiály, které jsou výjimečné pro svou širokou škálu dosažitelných vlastností a aplikací. Celosvětová produkce PUR se k roku 2016 odhaduje na 18 milionů tun (53 miliard euro), což jej umísťuje na 6. místo v celkové produkci polymerních materiálů. [15]

3.1 Syntéza prvků za vzniku PUR

Vlastnosti PUR mohou být přizpůsobeny široké škále výběru vhodných surovin pro výrobu a dostupné technologie zpracování. Syntéza je založena na reakci izokyanátových sloučenin a sloučenin nesoucích aktivní atomy vodíku, většinou s hydroxylovou funkční skupinou. Takovou reakcí vznikají polymery (v tomto případě PUR), v jejichž makromolekulárních řetězcích jsou uhlovodíkové bloky spojeny vazbami $-O-CO-NH-$. Výchozí suroviny pro přípravu PUR jsou izokyanáty, polyoly, extendery (prodlužovače řetězců) a katalyzátory. [13,15,17,20]

3.1.1 Polyoly

Charakteristickým rysem polyolů jsou jejich flexibilní řetězce s alespoň dvěma hydroxylovými koncovými skupinami, kde se molekulová hmotnost pohybuje v rozmezí 1000-6000 g/mol. Chemická struktura polyolů má zásadní vliv na pružnost a vlastnosti PUR za nízkých teplot. Měkké segmenty PUR se skládají z metylesteru nebo metyléteru. Teplota skelného přechodu měkkých segmentů je většinou nižší než $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přítomnost aromatických kruhů ovlivňuje tuhost struktury, zvyšuje tvrdost a mechanické vlastnosti PUR. Naopak přítomnost skupin éteru má opačný efekt: nižší bod tání, snížení mechanické pevnosti a zvýšení flexibility. Typ polyolu a jeho molekulární hmotnost hraje zásadní roli ve výsledných fyzikálních vlastnostech: od měkkých (nízkomodulových) a flexibilních PUR až po tuhé produkty. [15,16]

3.1.2 Izokyanáty

Izokyanáty se vyznačují specifickou distribucí elektronové hustoty v izokyanátové skupině (NCO), kvůli níž je uhlík vysoce náchylný k napadení nukleofily a elektrofilu dusíku a kyslíku. To je také důvod, proč izokyanáty snadno reagují téměř se všemi sloučeninami obsahujícími aktivní vodík, jako alkoholy, aminy, karboxylové kyseliny a voda. PUR získané z aromatických izokyanátů mají lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s PUR

získaným z alifatických izokyanátů. Alifatické diizokyanáty se spíše používají pro PUR používané v lékařství a potravinářském průmyslu, protože neobsahují karcinogenní aromatické skupiny a nežloutnou při vystavení slunečnímu záření. [15]

3.1.3 Extendery

Extendery, resp. „prodlužovače řetězců“, jsou nízkomolekulární sloučeniny, které zvětšují velikost tvrdých segmentů, hustotu vodíkových vazeb a molekulovou hmotnost PUR. Vliv extenderů je značný, i když jejich hmotnostní podíl většinou tvoří pouze malou část celku. Jejich reakce s izokyanáty probíhá v krátkém sledu a má za následek rychlé prodloužení řetězců polymeru, což lze poznat podle ostrého nárůstu viskozity. [15]

3.1.4 Katalyzátory

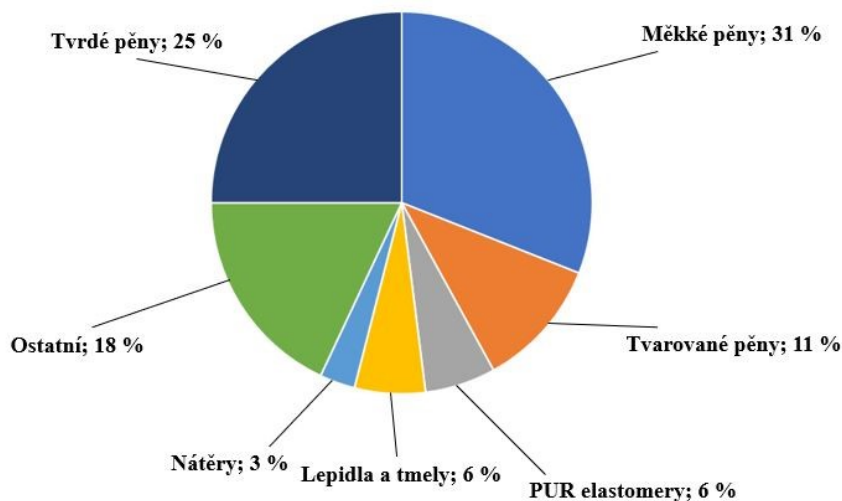
Katalyzátory, které se používají při syntéze polyuretanů, ovlivňují celkovou rychlost tvorby polymeru a umožňují ovlivnit jeho chemickou a fyzikální strukturu, tím pádem i vlastnosti hotového výrobku. Vhodné katalyzátory mohou přímo zacílit na požadované reakce, řídit rychlost růstu řetězce a také ovlivnit zesílení polymeru. Přítomnost katalyzátoru urychluje nejenom syntézní reakce, ale také degradaci řetězců PUR při jejich aplikaci, obzvláště hydrolyzu polyesterových PUR. Aktivita většiny katalyzátorů je založena na tvorbě přechodného komplexu izokyanátu, který reaguje se sloučeninou obsahující aktivní atomy vodíku. [15]

3.2 Vlastnosti, typy a použití PUR

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, vlastnosti PUR závisí na mnoha faktorech, primárně však na struktuře hlavního řetězce. Mezi obecně předpokládané vlastnosti patří:

- pružnost;
- vysoká nosnost v tahu i tlaku;
- odolnost proti oděru a nárazu;
- odolnost proti protržení;
- stálost v prostředí vody, olejů, vodných roztoků kyselin a zásad;
- výborná adheze k řadě materiálů aj.

Jako hlavní nevýhody je nutno zmínit náchylnost k mikrobiálnímu napadení a tendenci aromatických uretanů zbarvovat se (žlutě) při vystavení UV záření. Obr. 13 schematicky znázorňuje procentuální podíl celosvětové spotřeby PUR v různých odvětvích. [13,20]



Obr. 13 Celosvětová spotřeba PUR pro rok 2016 [19]

3.2.1 Lehčené hmoty

Při výrobě lehčených hmot je k základním surovinám přidána navíc voda. Reakcí diizokyanátů s hydroxylovými skupinami vznikají polyuretanové vazby a při reakci izokyanátových skupin s vodou vzniká vedlejší produkt ve formě CO_2 , který zastupuje funkci nadouvadla. Lehčené hmoty lze rozdělit na:

- měkké pěny – laminování textilu, izolační a těsnící pásy;
- tvrdé pěny – tepelné izolace;
- polotvrdé pěny – vyplňování dutin a izolace (izolace potrubí);
- integrální pěny – nárazníky, jádra lyží, opěrky. [13,19]

3.2.2 Lepidla

Polyizokyanáty jsou skvělé pro slepování materiálů jako např. kaučuku s celulozovými vlákny, kovy, sklem apod. Polyizokyanáty pro lepidla musí mít alespoň tři velmi reaktivní izokyanátové skupiny. Druhou složkou dvousložkového lepidla je pak polyester-alkohol. Polyestery s nižším obsahem hydroxylových skupin dávají spoje houževnaté a elastické, naopak pro vyšší obsah hydroxylových skupin vykazují pevnější a tvrdší spoje. Takové lepidla pak reagují s okolní vlhkostí a lepeným objektem za vzniku pevného spoje. [13,18,20]

3.2.3 Vlákná a filmy z lineárních polyuretanů

Lineární PUR má např. oproti polyamidům nižší navlhavost, lepší odolnost proti vodě, kyselinám, povětrnosti a lepší elektroizolační vlastnosti. Používají se jako vstřikovací hmoty pro výrobu kartáčů, řemenů, vlasců aj. K textilnímu použití jsou méně vhodné než polyamidy, protože jsou drsnější na dotek, rychle krystalizují, špatně se barví a nabíjí se statickou elektřinou. [13]

3.2.4 Polyuretanové elastomery

PUR elastomery lze připravit v různých tvrdostech s vysokou tažností. Takové PUR elastomery mají lepší elasticitu a odolnost proti opotřebení než ostatní elastomery. Dobře odolávají světlu, kyslíku a ozonu. Nevýhodou je však nízká tepelná odolnost a vysoká cena. Používají se na těsnění, membrány, pohonné řemeny aj. PUR elastomery lze vyrábět v podobě granulátu a vstřikovat. [13,17]

3.2.5 Polyuretanové licí pryskyřice

U licích pryskyřic je nežádoucí přítomnost stopových množství vody v bezrozpouštědlových kapalných složkách (i velmi malé množství vody v polyolu dokáže vyprodukovat tolik množství CO₂, že při napěnění dojde ke dvojnásobnému zvětšení objemu). Nachází své využití pro podlahoviny, pro zalévání kabelových koncovek, spár ve stavebnictví nebo pro atletické sportovní dráhy. [13]

3.2.6 Polyuretanové nátěrové hmoty

PUR nachází své využití také jako pojivo pro nátěrové hmoty. Můžeme je rozdělit na jednosložková nebo dvousložková. Jednosložková pojiva se dělí na uretanové alkydy (oleje) a na pojiva vytvrzované vlhkostí nebo teplem. Dvousložkové pojiva pak na vytvrzované polyolem nebo katalyzátory. [13]

3.3 Zpracování a recyklace PUR odpadu

Obavy ohledně zvyšujícího se množství plastového odpadu vedly k rozvoji recyklace. Metody mechanické recyklace, které mohou být použity pro všechny termoplastický odpad, se zaměřují zejména na změnu fyzické podoby odpadu (např. mletím nebo drcením) na takovou podobu, která je vhodná pro další zpracování. Naopak chemická recyklace se zaměřuje především na obnovení monomerů (případně oligomerů), které lze znovu použít pro syntézu nových polymerů. Poslední, ale důležitá metoda recyklace souvisí s rekuperací

energie, tj. spalování (zpopelnění). Z hlediska životního prostředí je taková metoda vhodná pouze v případě, jestliže není možné takový odpad recyklovat jinou metodou, popřípadě je recyklace jinou metodou příliš nákladná. V dalším vývoji metod recyklace by měla být zdůrazněna jistá efektivita v rámci nákladů a šetrnosti k životnímu prostředí. [21]

PUR odpad lze zpracovat každou výše zmíněnou metodou a některé mají širší průmyslové využití. Recyklační metody lze shrnout následovně:

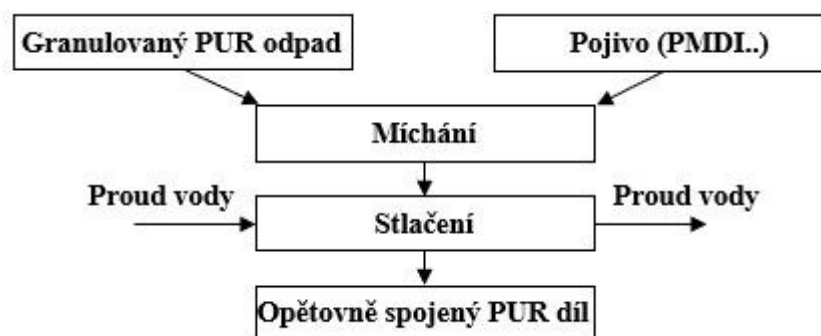
- mechanická recyklace (mletí/práškování, drcení, lisování);
- získání surovin recyklací – chemická recyklace (glykolýza, hydrolýza), termo-chemická recyklace (pyrolýza);
- rekuperace energie (spalování). [21]

3.3.1 Mechanická recyklace

Mechanická recyklace je spojena s drcením PUR odpadu za získání vhodných surovin (převážně ve fyzikální podobě), které lze využít pro další zpracování. Příkladem je míchání s adhezivou (lepidla) nebo lisování. Nejdůležitějším aspektem tohoto typu recyklace jsou nízké náklady a jednoduchost provedení této operace. Nevýhodou je bez pochyby zhoršení mechanických vlastností, které pak omezují aplikace nově získaných produktů. [21]

- **Proces tzv. opětovného spojení**

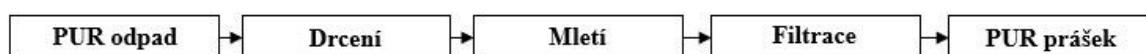
Proces opětovného spojení PUR odpadu je jednou z nejpoužívanějších recyklačních metod. Myšlenka tohoto procesu je prezentována na *Obr. 14*. Nejprve je odpad z PUR pěny rozemlet na jemné vločky, které se následovně spojí s pojivem difenylmetan-4-4-diizokyanátem (PMDI). V dalším kroku je směs zamíchána, a před stlačením je systém propláchnut horkou vodou, která PUR roztaví. Tato technologie je jednoduchá a levná. Nevýhodou jsou však nedostatečné mechanické vlastnosti nového produktu. Jedním z použití je např. koberecová podložka. [21]



Obr. 14 Proces opětovného spojení PUR odpadu [21]

- **Mletí a znovupoužití jako plnivo**

Předtím než lze PUR odpad využít jako plnivo, je nutno jej přetransformovat na prášek, což lze dosáhnout technologiemi jako drcení, mletí apod. Příklad tohoto procesu lze vidět na Obr. 15. Namletý PUR odpad ve formě prášku (s velikostí částic 50-200 μm a vyšší) může být využit jako plnivo do nových PUR výrobků. Hmotnostní podíl velmi kvalitního prášku se může přiblížit max. 20 %. Jelikož toto plnivo dobře interaguje s PUR matricí z důvodu podobných chemických skupin, není přítomnost negativních vlivů na mechanické vlastnosti příliš značná (nemusí být patrná vůbec). Výrobky získané touto metodou lze použít jako absorbery energie a zvukové izolanty, protože se PUR prášek chová jako tlumící prostředek. [21]



Obr. 15 Příklad procesu přeměny PUR odpadu na prášek [21]

3.3.2 Chemická recyklace

Polymerace PUR je z části vratný proces, pokud je prováděn při vhodných podmínkách. Funkční skupiny jako uretan, ester, ether a aminová vazba lze postupně depolymerizovat použitím organických sloučenin s aktivním atomem vodíku, který může napadat polární skupiny v hlavních PUR řetězci. Vhodná chemická činidla, podmínky reakce a katalyzátory vedou k získání oligomerů nebo monomerů. [21].

- **Glykolýza**

Glykolýza je proces, při kterém PUR reaguje s dioly při teplotě přesahující 200 $^{\circ}\text{C}$. Glykolýza je nejrozšířenější a nejpoužívanější metoda chemické recyklace pro PUR. Cílem je obnova polyolů pro produkci nových PUR materiálů. Principem této metody je zahřátí před-mletého PUR odpadu (PUR pěna) na několik hodin na teplotu 180-220 $^{\circ}\text{C}$ ve vysoko-

vroucích glykolech s katalyzátorem. Glykolem je většinou dietylglykol (DEG) s pomocným činidlem dietanol-aminem (DEA). Teplota pod 180 °C vykazuje příliš nízkou aktivitu katalyzátoru, a teplota nad 220 °C vede k nežádoucí reakci na aminy. Po dokončení chemické reakce je materiál ochlazen, filtrován nebo smíchán s panenským polyolem nebo formulován do polyol/izokyanátových systémů, které jsou prodávány výrobci PUR produktů. [22]

- **Hydrolyza**

Hydrolyza je reakce PUR s vodou, přičemž produkty, které vznikají, jsou jak polyoly tak i aminové meziproducty. Po dokončení hydrolyzy lze vzniklé polyoly využít jako efektivní palivo a aminové meziproducty jde znovu použít ke vzniku ostatních PUR komponentů. Tato metoda využívá ohřáté, kyslíku zbavené prostředí k rozpadu PUR a dalších složek na plyny, oleje a pevné složky. [22]

3.3.3 Rekuperace energie

Rekuperace energie je často považováno jako jediný způsob likvidace PUR odpadu, kdy odpadní materiál (např. lamináty, kůže nebo tkaniny) nejde recyklovat mechanickým nebo chemickým způsobem. V případě PUR s přísadami retardérů hoření je plné využití této metody obtížné, takže se v dnešní době hledají způsoby, jak zlepšit zpracování PUR materiálu právě s přísadami těchto typů retardérů. Na druhé straně, spalováním PUR pěn dochází ke značnému snížení objemu těchto materiálů na skládkách. [21]

4 ZPRACOVÁNÍ POLYMERNÍCH SMĚSÍ

Polymerní směs lze jednoduše definovat jako systém, který obsahuje polymer a přísady. Některé přísady dodávají výrobku vlastnosti, které samotný polymer neposkytuje (aktivní plniva, antidegradanty apod.), jiné napomáhají snadnějšímu zpracování (plastikační činidla, maziva apod.), další jen zlepšují vzhled (pigmenty) nebo snižují jeho cenu (neaktivní plniva). [11,23]

4.1 Hnětení

Technologie hnětení je přípravná technologie v plastikářském průmyslu, přičemž jde o intenzivní míchání směsí. Při hnětení je hmota v roztaveném (změkklém) stavu a stupeň homogenity závisí na intenzitě smykového namáhání v daném systému. Touto technologií rozumíme převedení polymeru (makromolekulární látky) působením tepla do plastického stavu a její zhutnění za současného intenzivního míchání. V takovém stavu lze látku ihned zpracovat. Hlavním parametrem pro zvolení vhodného hnětiče je skupenství hnětené směsi a objem, který chceme hnětat. Pro ideální homogenizaci je potřeba dbát pozornost na parametry jako je teplota a čas, po který danou směs hněteme. Homogenizaci, resp. homogenizační jednotce je potřeba věnovat značnou pozornost, aby bylo dosaženo požadovaných výsledků. [24,25]

4.2 Lisování

Lisování je nejstarším způsobem zpracování polymerních systémů. Jedná se o tváření polymerů, popř. polymerních směsí při zvýšené teplotě a tlaku, přičemž požadovaný tvar dává materiálu forma. Tato technologie se dělí na lisování vysokotlaké a nízkotlaké. K vysokotlakému lisování (tedy lisování tlakem vyšším než 3 MPa) se používají výhradně pístové hydraulické lisy. Tvar výlisku určuje lisovací forma, která musí být vhodným způsobem umístěna v lisu. K zajištění dokonalého vyplnění formy je zapotřebí použít takové množství materiálu, aby vždy vznikl přetok. Používá se také separační činidlo, které napomáhá vyjmutí výlisku z formy. Takto se zpracovávají převážně reaktoplasty a kaučukové směsi. Pro zpracování termoplastů se užívají tzv. etážové (několikapatrové) lisy a vyrábí se tak např. desky nebo fólie. Nízkotlaké lisování se pak používá především na tváření reaktoplastů a k výrobě vyztužených polyesterů. [11]

5 METODY VYHODNOCENÍ VYBRANÝCH VLASTNOSTÍ

Pro vyhodnocení vlastností materiálů (v tomto případě kompozitů) existuje nespočet různých zkoušek, měření či testování. V této diplomové práci se však budeme zabývat pouze zkouškou tahem, infračervenou spektroskopií s Fourierovou transformací a měřením přenosového útlumu.

5.1 Zkouška tahem

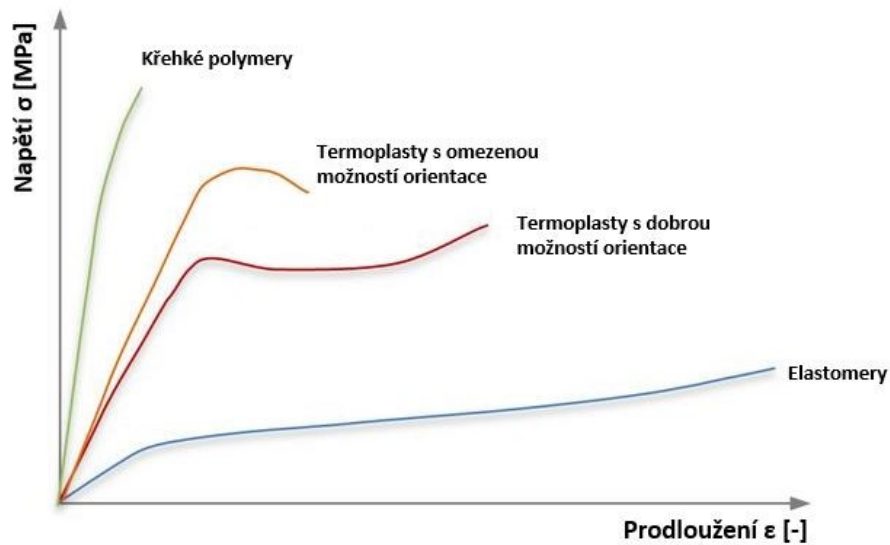
Zkouška tahem spadá pod kategorií statických zkoušek. Jedná se o nejrozšířenější materiálovou zkoušku, jejíž výsledkem jsou určité materiálové charakteristiky – tedy kvantitativní vyčíslení jednotlivých mechanických vlastností. Zkouška tahem se neprovádí na finálních výrobcích, nýbrž na zkušebních vzorcích. Tyto vzorky lze vyrobit vstříkáním, vyřezáním z vylišovaných desek nebo obráběním. Zkouška tahem je pro plasty normovaná, tedy rozměry tělísek, podmínky a vyhodnocení je detailně popsáno normou ČSN EN ISO 527-1 (ke dni 25.1.2022 je tato norma stále platná). [26]

- **Průběh tahové zkoušky – obecně**

Zkušební tělísko se upne do čelistí stroje tak, aby jeho podélná osa byla shodná s osou zatěžování. Upínání musí zabránit vyklouznutí tělíska a jeho předčasné deformaci. Vzorek nesmí být před zkouškou nijak předpjatý. Po vyrovnání se na počáteční měřenou část nastaví extenzometr. Zkušební těleso je pak protahováno ve směru hlavní podélné osy stroje konstantní rychlostí až do porušení nebo do chvíle, kdy napětí v tahu nebo protažení dosáhne předem určené hodnoty. Při měření se zaznamenávají různé materiálové charakteristiky (pevnost v tahu, prodloužení, modul pružnosti v tahu E atd.) a vykresluje se tahová křivka, která je pro různé materiály, popř. vzorky z polymerních směsí odlišná. [27]

- **Tahová křivka**

Jak lze vidět na *Obr. 16*, tahová křivka je pro každý materiál odlišná. Některý materiál nemusí mít značnou mez kluzu, některý se příliš dlouho neřídí Hookovým zákonem a u některých dojde k porušení až při velmi vysokém napětí za velmi nízkého prodloužení (opačným extrémem je pak velmi velké prodloužení za nízkého napětí). [28]



Obr. 16 Průběh tahové zkoušky pro různé typy polymerů [28]

Mechanické vlastnosti plastů závisí jak na napětí, tak teplotě. Při nízkém napětí je deformace většiny pevných látek elastická, což znamená, že při odstranění zatížení se plast vrátí do původní velikosti a tvaru. V takovém případě je napětí přímo úměrné deformaci a platí tzv. Hookův zákon.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (1)$$

kde: σ – napětí [MPa],

E – Youngův modul pružnosti v tahu [MPa],

ε – poměrné prodloužení [-].

Youngův modul pružnosti v tahu je hodnota, která říká, kolik napětí je potřeba pro vykonání jednotkové deformace. Pokud porovnáme 2 materiály, tak materiál s větším modulem E potřebuje pro vyvolání stejné deformace vyšší napětí.

Při tahové zkoušce se mění délka tělíska z původní délky l_0 na l , přičemž dochází k protažení. Tuto deformaci označujeme jako poměrné prodloužení ε .

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ [-]} \quad (2)$$

kde: Δl – rozdíl mezi finální a původní délkou [mm].

Při samotné zkoušce je pak zátěž vztahována k původnímu průřezu, což je známo jako smluvní napětí σ_T .

$$\sigma_T = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

kde: F – síla [N],

S_0 – původní průřez [mm].

5.2 FTIR (Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací)

Infračervená spektroskopie je nedestruktivní analytická metoda, kdy zkoumaný vzorek není analýzou nijak poškozen a my získáváme informace o jeho složení. Tyto informace souvisí s pevností chemických vazeb, molekulovou geometrií a hmotnostmi jader, tedy molekulovou strukturou. Infračervená spektroskopie se používá pro materiálovou analýzu více než 70 let. Infračervené spektrum pak představuje „otisk prstu“ vzorku s absorpčními píky (vrcholy), které odpovídají frekvenci vibrací mezi vazbami atomů, které tvoří daný materiál. Jelikož má každý materiál unikátní kombinaci atomů, nemůže se stát, aby dva různé vzorky vytvářely stejné infračervené spektrum. Tím pádem jsme schopni identifikovat (provést kvalitativní analýzu) libovolný materiál. Navíc, velikost píků (vrcholů) přímo odkazuje na množství funkčních skupin, které jsou v materiálu obsaženy. FTIR je tedy metoda, jejíž základem je infračervená spektroskopie. Při měření se vzorek vystaví infračervenému záření, kdy se část záření absorbuje do vzorku a způsobí charakteristické vibrace vazeb, a část záření projde skrz vzorek. Výsledkem je pak tzv. „otisk prstu“ vzorku, tak jak bylo vysvětleno na začátku této kapitoly. [29]

Co FTIR poskytuje:

- identifikaci neznámých materiálů;
- informace o kvalitě a konzistenci vzorku;
- informace o množství jednotlivých komponentů v dané směsi (resp. vzorku).

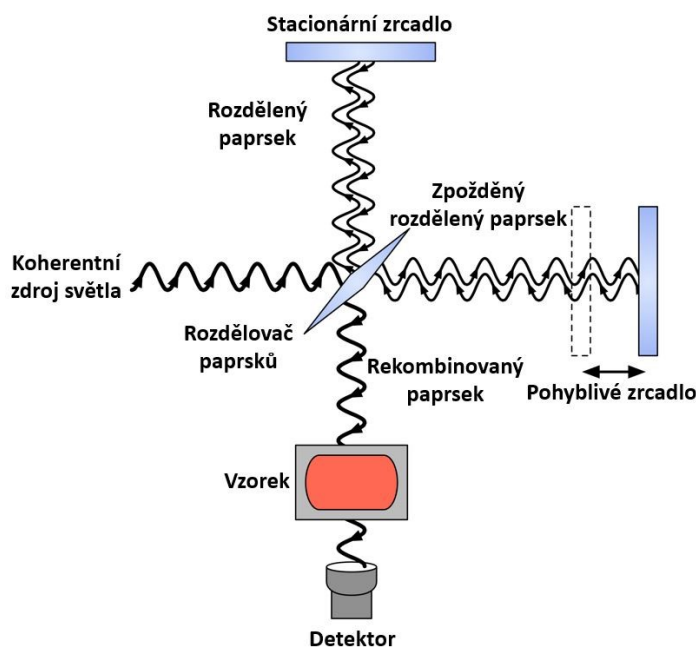
Využití FTIR:

- životní prostředí – pro kontrolu kvality vody, ovzduší a analýzu půdy vzhledem k znečištění;
- potravinářství – rychlé stanovení obsahu trans-tuků a tedy podporuje zdravé stravovací návyky;

- forenzní věda – protidrogové agentury a policejní oddělení využívají FTIR pro identifikaci drog;
- léčiva – zajišťují shodu s předpisy u léků apod;
- polymery a plasty – pro identifikaci složení kompozitů, směsí, plniv, barviv apod. [30]

Komponenty FTIR zařízení:

- zdroj – infračervené záření je vyzařováno ze zdroje, přičemž paprsek prochází otvorem, který řídí množství záření, které se dostane ke vzorku, a tedy i k detektoru;
- interferometr – paprsek vstupuje do interferometru, kde probíhá spektrální kódování. Interferometr používá pro přesnost referenční laser;
- vzorek – paprsek vstupuje do komory pro vzorky, kde je přenášený buď skrz vzorek nebo je od vzorku odražen (záleží na jakém systému je měření provedeno);
- detektor – paprsek nakonec prochází do detektoru pro konečné měření;
- počítač – naměřený signál je poté digitalizován a odeslán do počítače, kde probíhá Fourierova transformace. [29]



Obr. 17 Schéma FTIR zařízení [31]

5.3 Měření přenosového útlumu

Vibracemi se rozumí jakýkoliv pohyb, který se opakuje v periodických intervalech. Jsou dány pohybem pružného tělesa, jehož jednotlivé body kmitají okolo své rovnovážné polohy. Ač může být mechanické kmitání užitečné (pěchovací lisy, vibrační válce atp.), v technické praxi je tomu naopak. Mechanické vibrace jsou vyvozeny především stroji (obráběcí) nebo prostředky (dopravní) a mohou vést k problémům při výrobě a procesech. Eliminovat vibrace lze např. pomocí pružného uložení strojů, tvarovaných elastických prvků, vícevrstvých materiálů apod. To, jakou má materiál schopnost tlumit mechanické vibrace, charakterizuje decibelová veličina zvaná přenosový útlum. Přenosový útlum se měří metodou nucených kmitů. Měřicí aparatura se sestává z budicího vibrátoru, zesilovače, analyzátoru a počítače pro uložení a vyhodnocení dat. Nejprve je však nutno definovat veličinu Td – index přenosu mechanického kmitání (v angličtině displacement transmissibility). [32,35]

Td je dán rovnicí:

$$Td = \frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{k^2 + (c \cdot \omega)^2}{(k - m \cdot \omega^2)^2 + (c \cdot \omega)^2}} = \sqrt{\frac{1 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot r^2}{(1 - r^2)^2 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot r^2}} \quad [-] \quad (4)$$

kde: $\zeta = 0,5 \cdot c / (m \cdot k)^{0,5}$ – tlumící poměr [-],

$r = \omega / \omega_n$ – poměr kruhových frekvencí [-],

$\omega_n = (k/m)^{0,5}$ – vlastní netlumená frekvence oscilátoru [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],

X – amplituda posunu na vstupní straně vzorku [m],

Y – amplituda posunu na výstupní straně vzorku [m].

Přenosový útlum se vypočítá ze vztahu:

$$D = 20 \cdot \log \frac{v_{01}}{v_{02}} \quad [dB] \quad (5)$$

kde: v_{01} – amplituda rychlosti na vstupní straně testovaného materiálu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

v_{02} – amplituda rychlosti na výstupní straně testovaného materiálu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Přenosový útlum je závislý na mnoha parametrech, hlavně na typu materiálu, tloušťce, struktuře, frekvenci kmitů a zatížení. Proto u různých frekvencí vzniká jeden ze tří případů kmitání:

- $D > 0$ – amplituda na výstupu je menší než na vstupu – dochází k tlumení kmitů;
- $D = 0$ – amplituda vstupní a výstupní je stejná – nedochází ani k tlumení ani zesilování kmitů;
- $D < 0$ – amplituda na výstupu je větší než na vstupu – dochází k zesílení kmitů (rezonanci). [32,35]

Využitím rovnic (4) a (5) lze získat vztah mezi funkcemi T_d a D (6).

$$D = 20 \cdot \log \frac{1}{T_d} [dB] \quad (6)$$

Při podmínce $dT_d/dr = 0$ z rovnice (4) získáme frekvenční poměr r_0 , kde má index transmissibility své maximum (nebo přenosový útlum minimum).

$$r_0 = \frac{\sqrt{1+8\cdot\zeta^2-1}}{2\cdot\zeta} [-] \quad (7)$$

Lokální extrémů indexu transmissibility nebo přenosové funkce se s rostoucím poměrem tlumení ζ posouvají k nižším hodnotám frekvenčního poměru r_0 . Proto se dá měření přenosového útlumu využít jako nedestruktivní zkouška oproti zkoušce tahové. Čím tužší je materiál (tuhost je úměrná modulu E), tak klesá hodnota poměru tlumení ζ a minimum funkce přenosového útlumu D se posouvá k vyšším hodnotám frekvenčního poměru r_0 . Jednoduše řečeno, čím tužší materiál, tím vyšší frekvence odpovídá poloze minima přenosového útlumu. [35]

6 SHRNUÍ TEORETICKÉ ČÁSTI A CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI

V první kapitole diplomové práce jsou popsány kompozitní materiály jak z hlediska vlastností, použití, tak z hlediska jednotlivých komponent, které tyto materiály nutně tvoří. Krátká část se pak věnuje nanokompozitům. Další kapitola je věnována polymerním materiálům, a to konkrétně polyolefinům a styrenovým polymerům. Třetí kapitola má čtenáře seznámit s problematikou PUR – jak vzniká a z jakých prvků, jaké má vlastnosti a použití. Nezbytnou součástí tvoří kapitola, která se věnuje zpracováním a recyklaci PUR odpadu. V předposlední kapitole je stručně popsán proces zpracování polymerních směsí, konkrétně hnětení a lisování. Poslední část diplomové práce popisuje, jak fungují metody měření určitých vlastností, které byly vybrány pro zpracování praktické části.

Cíle diplomové práce lze shrnout do následujících bodů:

- vytvoření kompozitů v kombinaci polymer (matrice) a PUR odpad (plnivo),
- návrh směsí a výroba vzorků vhodnou technologií,
- experimentální testování pomocí vhodně vybraných metod,
- zkoumání závislostí a diskuze výsledků,
- návrh aplikace kompozitů na základě experimentální části a vytvoření ekonomického rozboru,
- závěr a přínos práce pro praxi.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 PŘÍPRAVA EXPERIMENTU

Před začátkem experimentu bylo zapotřebí zvolit technologie, kterou se mají vzorky vyrobit, a v jakých koncentracích budou směsi, resp. kompozity. Z počátku byl záměr vytvořit vzorky na vstřikovacím stroji. Pro vstřikovací stroj je nutno připravit granulát, který se ve formě strun vytlačí na šnekovém vytlačovacím stroji. Ze začátku experimentu byla rozmyšlena maximální koncentrace plniva (PUR odpadu) 50 %. Při vyzkoušení této koncentrace na šnekovém vytlačovacím stroji, byla struna vycházející z hlavy v nepříjemném stavu. Z tohoto důvodu byla volba technologie pro výrobu vzorků přehodnocena. Nakonec byla zvolena kombinace hnětiče (pro co nejvyšší homogenizaci směsi) a horkého lisu.

7.1 Volba polymerních materiálů, plniva a koncentrací

Pro matrici byly zvoleny tyto materiály:

- LDPE – DOW 150 E.
- HDPE – Exxonmobil HTA 002.
- ABS – Trinseo MAGNUM 3325 MT.
- Maleinizovaný PE (MAPE) – Priex 15005.

Jako plnivo pak:

- PUR odpad – Praktik System s.r.o. (jedná se o velmi jemný prášek z rozemleté PUR pěny – izolace z lednic).

Jednalo se o materiály z kategorie nepolárních (LDPE, HDPE) a polárních (ABS, MAPE, PUR) polymerů. Jelikož je PUR polární, měl by mít lepší mechanické vlastnosti společně s jiným polárním komponentem (jednoduše řečeno, synergie mezi řetězci dvou polárních polymerů je silnější). Proto byl do nepolárních matric přidán MAPE, který je polární. Úkolem MAPE je „zavěsit“ na řetězec LDPE/HDPE heteroatom, který by měl zvýšit polaritu matrice. Tuto souvislost lze pak ověřit při srovnání výsledků tahové zkoušky, a ujistit se, jestli má maleinizace nepolárních polymerů smysl v kombinaci s PUR, který je polární.

Vzhledem k tomu, že byl k míchání směsi využit hnětič s komůrkou na 40 g materiálu, bylo nutno nejprve otestovat, kolik může být maximální zastoupení plniva v hm. %, aby byla směs, pokud možno dokonale homogenizována. Ač by hnětič zvládnul zamíchat až 60 % plniva, nejistota homogenizace rozhodla o zvolení maximální koncentrace na 50 %.

Koncentrace jednotlivých komponent je uvedena v *Tab. 4* a *Tab. 5*. Celková hmotnost je 40 g. MAPE byl přidán v 5 hm.% pro všechny koncentrace plniv a pouze do LDPE a HDPE. Referenční materiál maleinizovaných směsí je čistý polymer. Směs s přidavkem maleinizovaného PE má v této práci předponu m-.

Tab. 4 Množství jednotlivých složek pro základní směsi

Základní směs		
Plnivo [hm %]	Polymerní matrice [g]	Plnivo [g]
0	40	0
10	36	4
20	32	8
30	28	12
40	24	16
50	20	20

Tab. 5 Množství jednotlivých složek pro maleinizované směsi

Maleinizovaná směs			
Plnivo [hm %]	Polymerní matrice [g]	MAPE [g]	Plnivo [g]
0	40	0	0
10	34	2	4
20	30	2	8
30	26	2	12
40	22	2	16
50	18	2	20

7.2 Výroba vzorků

Výroba vzorků se sestávala z několika etap, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

7.2.1 Hnětení

Každá ze směsí byla hnětena a homogenizována na laboratorním hnětiči Brabender. Jedná se o zařízení vybavené dvěma otáčejícími se hnětadly, přičemž plnicí komora je vyhřívána. Parametry jako otáčky hnětadel, množství celkové navážky a doba hnětení se během přípravy vzorků nezměnily.

- Doba hnětení – 5 minut.
- Otáčky hnětadel – 30 ot/min.

- Celková navážka – 40 g.
- Teplota pro ABS – 220 °C.
- Teplota pro LDPE a kombinaci LDPE a MAPE – 165 °C.
- Teplota pro HDPE a kombinaci HDPE a MAPE – 180 °C.



Obr. 18 Laboratorní hnětič Brabender [33]

7.2.2 Lisování v horkém lisu

Směs byla po vytažení z hnětiče vložena do horkého ručního lisu. Ve formě byla pak ze směsi vylisována destička o tloušťce 2 mm. Celkově byly vytvořeny 3 destičky pro každou koncentraci a typ směsi.

- Doba lisování – 5 minut.
- Teplota pro ABS – 220 °C.
- Teplota pro LDPE a kombinaci LDPE a MAPE – 180 °C.
- Teplota pro HDPE a kombinaci HDPE a MAPE – 190 °C.



Obr. 19 Ruční lisy [33]

7.2.3 Lisování ve studeném lisu

Horká vylisovaná destička byla pak přesunuta do hydraulického vulkanizačního lisu. Lis neměl zapnutý ohřev, tím pádem se využil pouze pro chlazení.

- Doba chlazení – 5 min.



Obr. 20 Vulkanizační lis (v tomto případě pouze pro chlazení) [33]

7.2.4 Vyseknutí vzorků

Jelikož nebyla možnost využít pro výrobu vzorků na tahovou zkoušku vstřikovací stroj, bylo nutno vzorky vyseknout z vyrobené destičky. Byl použit vysekávací stroj ZPS 06102 P1. Zkušební vzorky jsou v souladu s platnou normou ČSN EN ISO 527-2 (typ tělíska 5A). Jediný problém nastal u ABS. Tento materiál se při zásahu vysekávacím ramenem roztříštil. Destičky z ABS byly proto nařezány na proužky o šířce 10 mm, a ty následně použity jako alternativní vzorky pro tahovou zkoušku. Z jedné destičky se podařilo vyseknout cca 12 vzorků. Celkem byly použity 2 destičky, jedna zůstala pro rezervu.



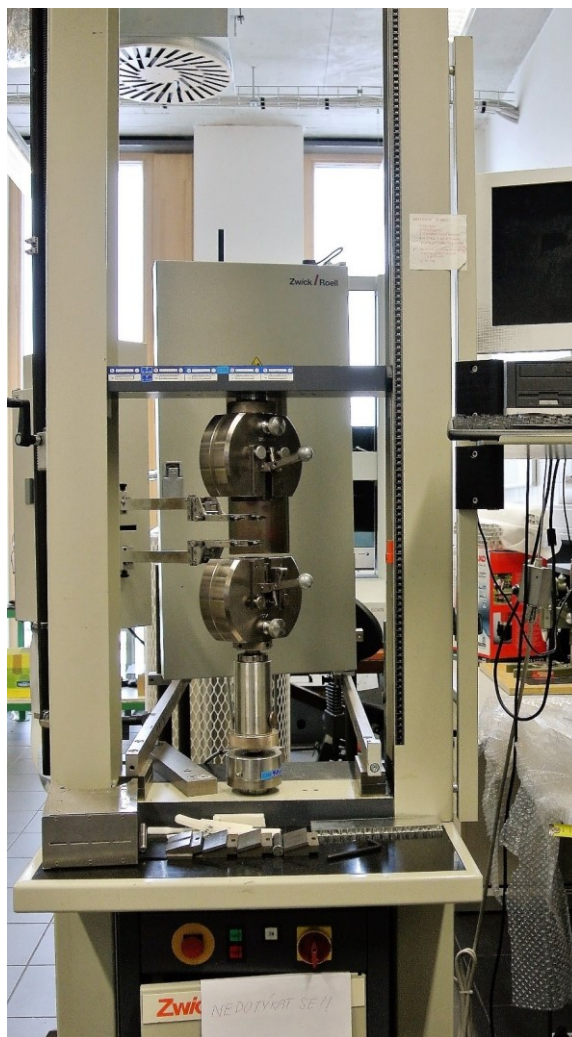
Obr. 21 Vysekávací stroj ZPS 06102 P1 [33]

8 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V následujících podkapitolách jsou jednotlivé experimenty popsány a získaná data okomentovaná v rámci diskuze.

8.1 Zkouška tahem

Tahová zkouška proběhla na stroji Zwick/Roell 1456. Jedná se o univerzální zkušební stroj, který se používá pro určení materiálových vlastností při statických zatíženích v tahu, tlaku a ohybu. Pro nastavení stroje před zkouškou a export dat včetně vyhodnocení slouží software testXpert. Před samotnou zkouškou bylo nutno vyměnit čelisti (pro tělíska 5A), zadat rozměry vzorků, nastavit posuvovou rychlost, rozteč extenzometru apod. Pro měření každé koncentrace dané směsi bylo použito 10 vzorků.



Obr. 22 Zkušební stroj Zwick/Roell 1456 [34]

Tab. 6 Technická specifikace zkušebního stroje Zwick/Roell 1456 [34]

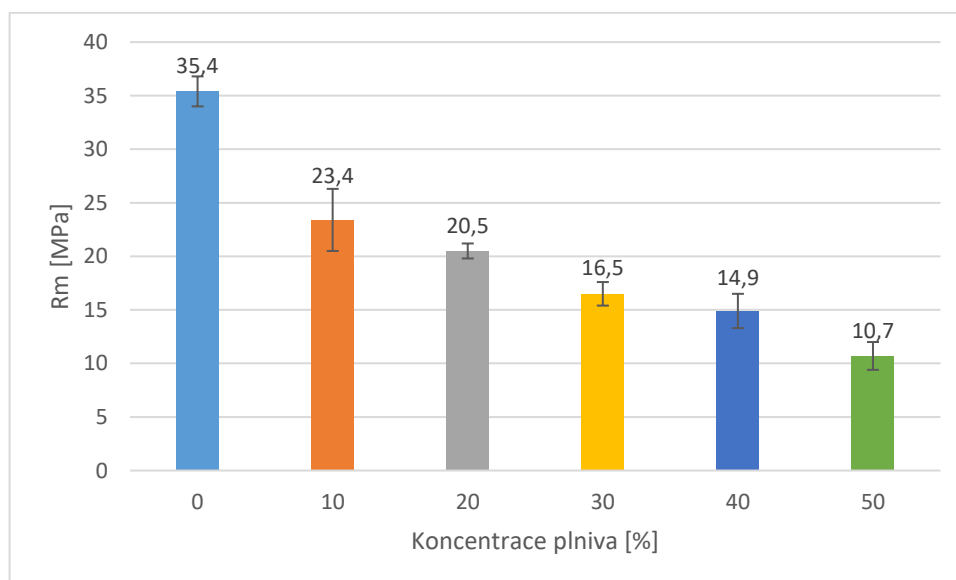
Název	Zwick/Roell 1456
Max. zkušební síla [kN]	20
Max. posuv příčnicku [mm/min]	800
Software	testXpert
Zkoušky	Tah/Tlak/Ohyb
Možnost využití temperační komory	Ano
Rozmezí teplot [°C]	-80 až +250

Cílem této zkoušky bylo proměřit jednotlivé směsi a jejich koncentrace pro parametry:

- Mez pevnosti v tahu (R_m),
- Modul pružnosti v tahu (E).

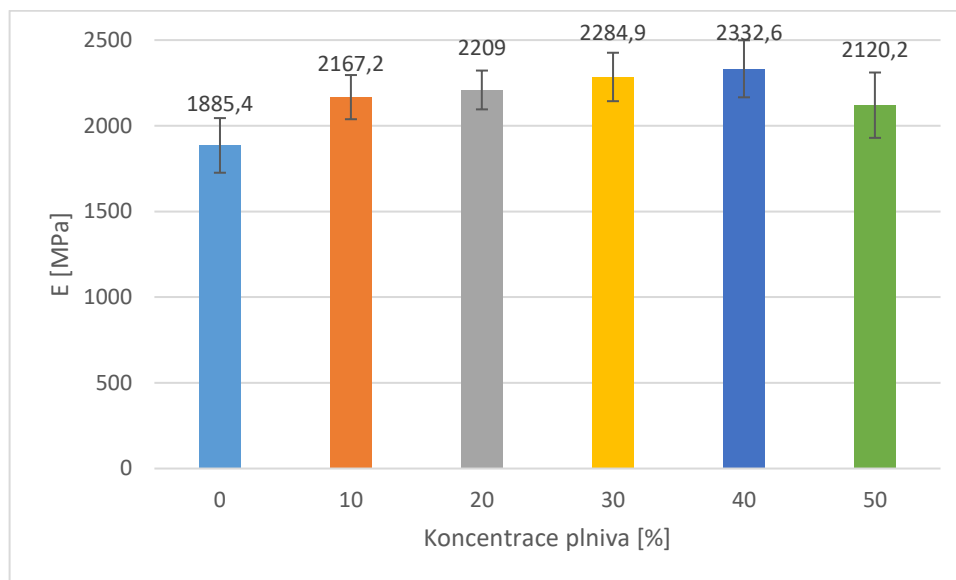
8.1.1 Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – ABS

Z Obr. 23 je patrné, že se zvyšující se koncentrací plniva se parametr R_m snižuje. Nejvyšší hodnota je pro čistý polymer, nejnižší pak pro 50% obsah plniva. Za povšimnutí stojí velký pokles parametru mezi čistým polymerem a směsí obsahující 10 % plniva (33 %). U ostatních koncentrací se pokles pohybuje v rozmezí 9-28 %.



Obr. 23 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – ABS

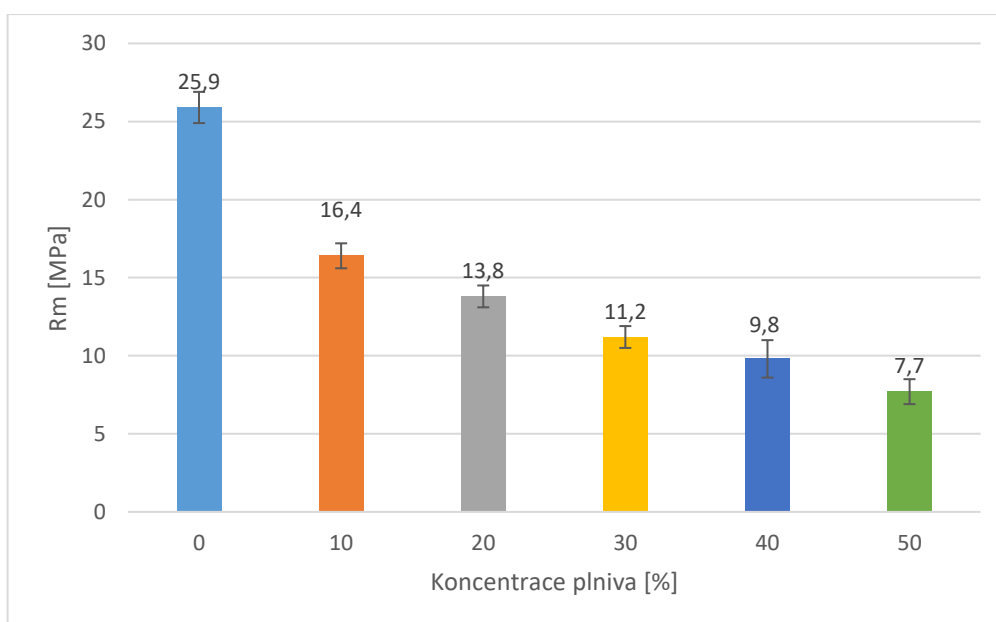
Výsledky modulu E pro směsi ABS (Obr. 24) poukazují na fakt, že se zvyšující se koncentrací plniva modul E roste. Výjimku však tvoří 50% koncentrace, při které se hodnota parametru E snížila na hodnotu blížíící se 10% koncentraci. Nejmenší hodnotu parametru E má tedy čistý polymer, nejvyšší pak směs se 40% plněním.



Obr. 24 Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – ABS

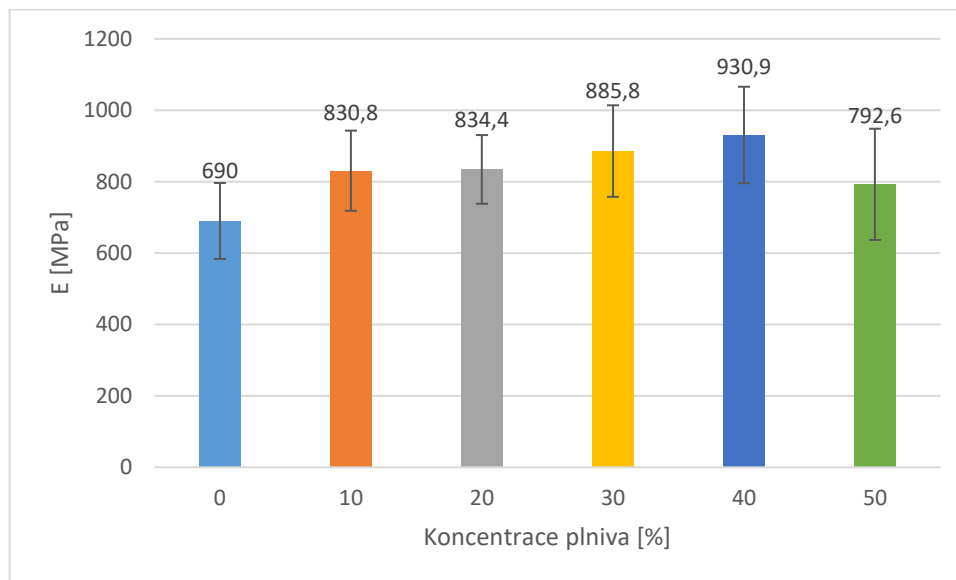
8.1.2 Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – LDPE

V Obr. 25 je jasně viditelný trend, a to ten, že se zvyšujícím se obsahem plniva parametr R_m klesá. Největší pokles je mezi referenčním vzorkem a vzorkem s 10% obsahem plniva (36 %). Další poklesy se pohybují mezi 12-21 %.



Obr. 25 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – LDPE

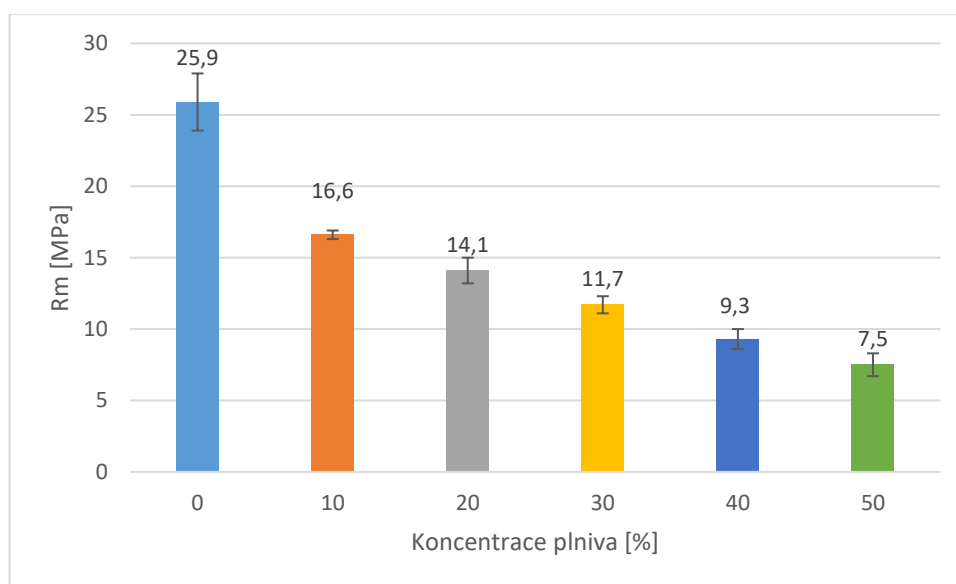
V případě modulu E u směsi LDPE má zvyšující se koncentrace plniva pozitivní vliv, čemuž napovídá *Obr. 26*. Hodnota tohoto parametru se zvyšuje až do obsahu plniva 40 %, a u 50% koncentrace se hodnota vrací pod hodnotu 800 MPa.



Obr. 26 Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – LDPE

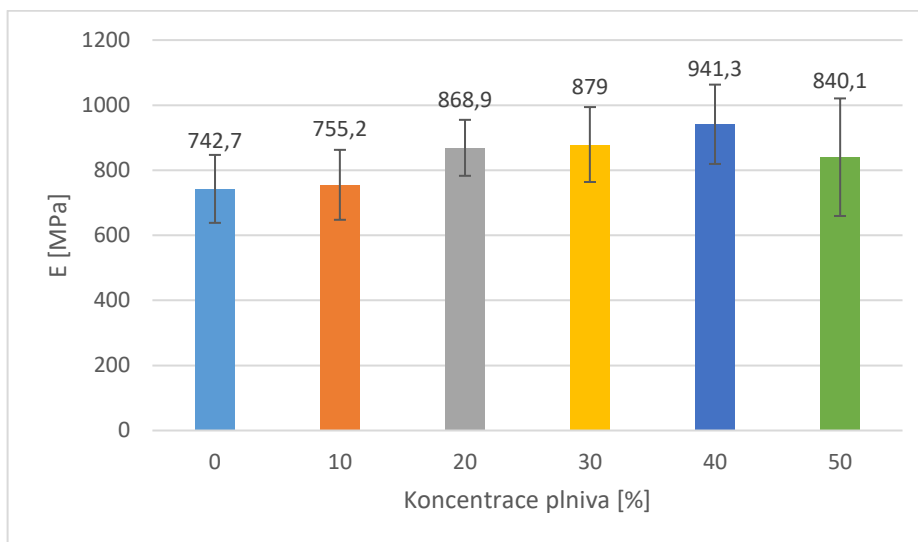
8.1.3 Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – HDPE

Podobně jako u předchozích směsí, tak i *Obr. 27* poukazuje na fakt, že zvyšující se koncentrace plniva má negativní vliv na mez pevnosti v tahu. Míra poklesu z čistého polymeru na nejnižší koncentraci plniva je přibližně 36 %. Ostatní poklesy parametru R_m při rostoucí koncentraci odpovídají 10-20 %.



Obr. 27 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – HDPE

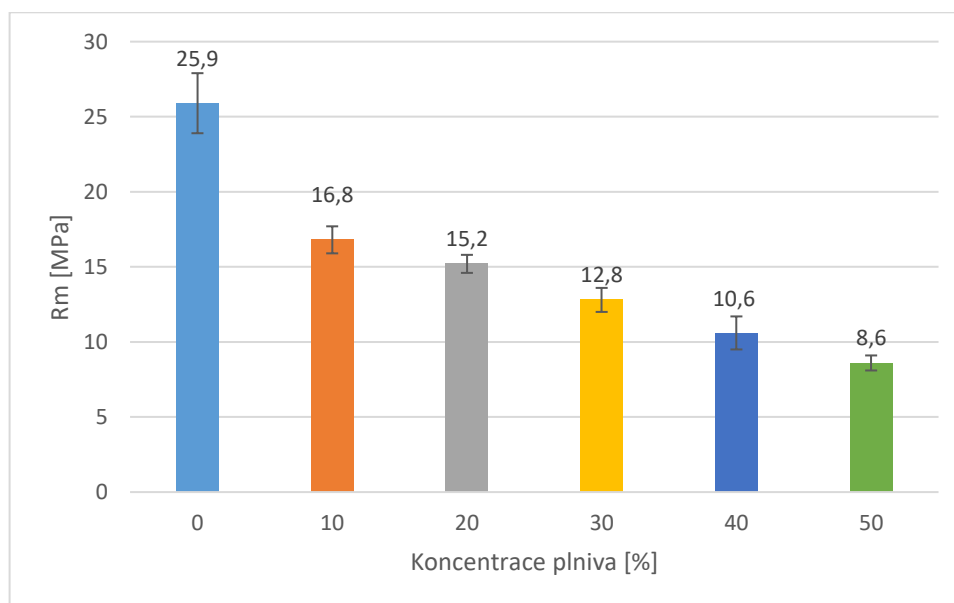
Obr. 28 poukazuje na zvyšování hodnoty modulu pružnosti v tahu se zvyšující se koncentrací plniva, a to až do 40 hm. %. Oproti ostatním směsím je nárůst hodnoty parametru E mezi 0 a 10% plněním nejnižší. U 50% koncentrace plniva sice modul E opět klesá, není to však tak velké snížení, jako pro ostatní testované směsi.



Obr. 28 Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – HDPE

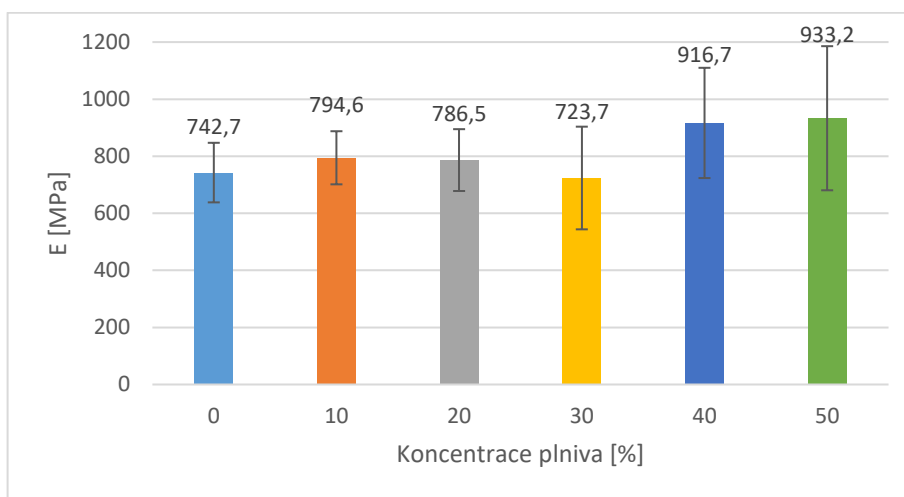
8.1.4 Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-HDPE

Pro směs m-HDPE je jako referenční materiál (0 % plniva) použit čistý HDPE. Při pohledu na Obr. 29 si lze povšimnout, že mez pevnosti v tahu se u směsi m-HDPE snižuje s rostoucí koncentrací plniva. I pro tuto směs se zde objevuje výrazný skok parametru R_m už při nízkém obsahu plniva (35 %). Následný pokles meze pevnosti je v rozmezí 9-19 %.



Obr. 29 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – m-HDPE

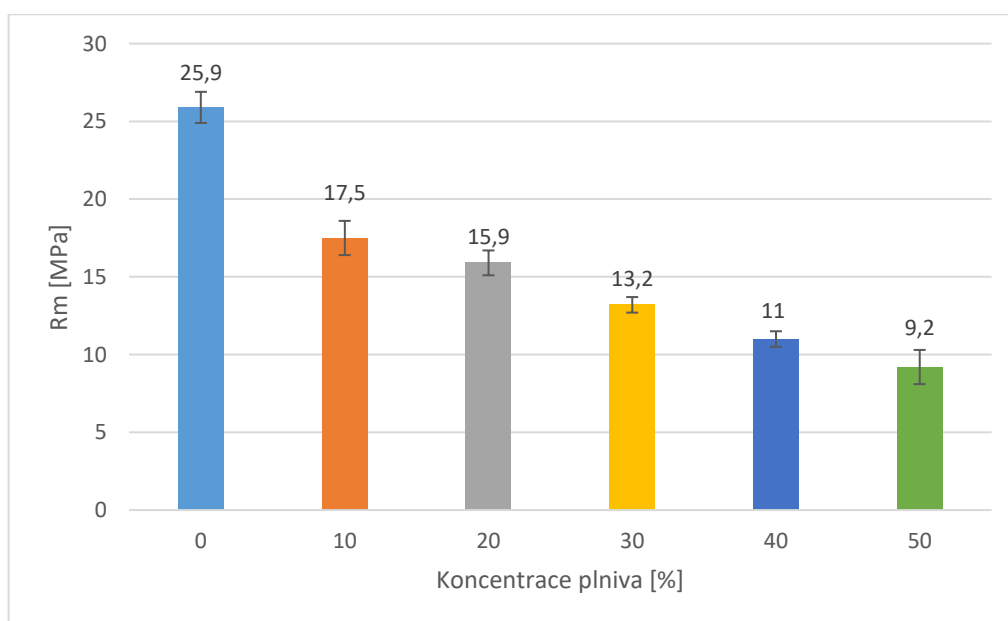
U maleinizované směsi HDPE – *Obr. 30*, je trend u modulu pružnosti těžce pozorovatelný. Parametr se zvyšuje do 10% plnění, s dalšími koncentracemi klesá – pokles končí na 30% plnění a od 40% obsahu plniva má vzestupnou tendenci. Nejnižší hodnota modulu E je pro 30% koncentraci, nejvyšší pro maximální zastoupení plniva.



Obr. 30 Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – m-HDPE

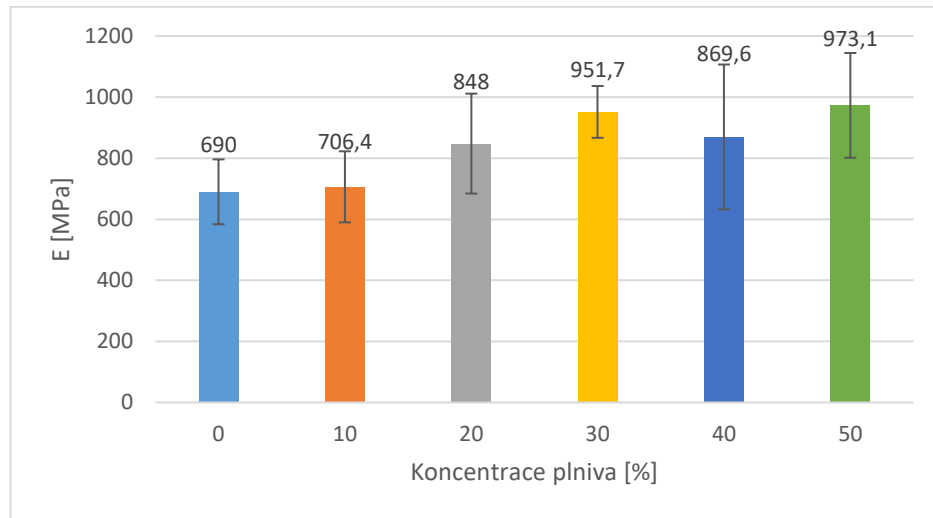
8.1.5 Mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-LDPE

Pro směs m-LDPE je jako referenční materiál (0 % plniva) použit čistý LDPE. Na *Obr. 31* je vidět klesající hodnota parametru R_m se zvyšujícím se plněním. Tak jako u předchozích směsí, propad mezi čistým polymerem a nejnižší koncentrací plniva je značný – 32 %. Pro vyšší koncentrace je pokles nižší, a to mezi 9-16 %.



Obr. 31 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – m-LDPE

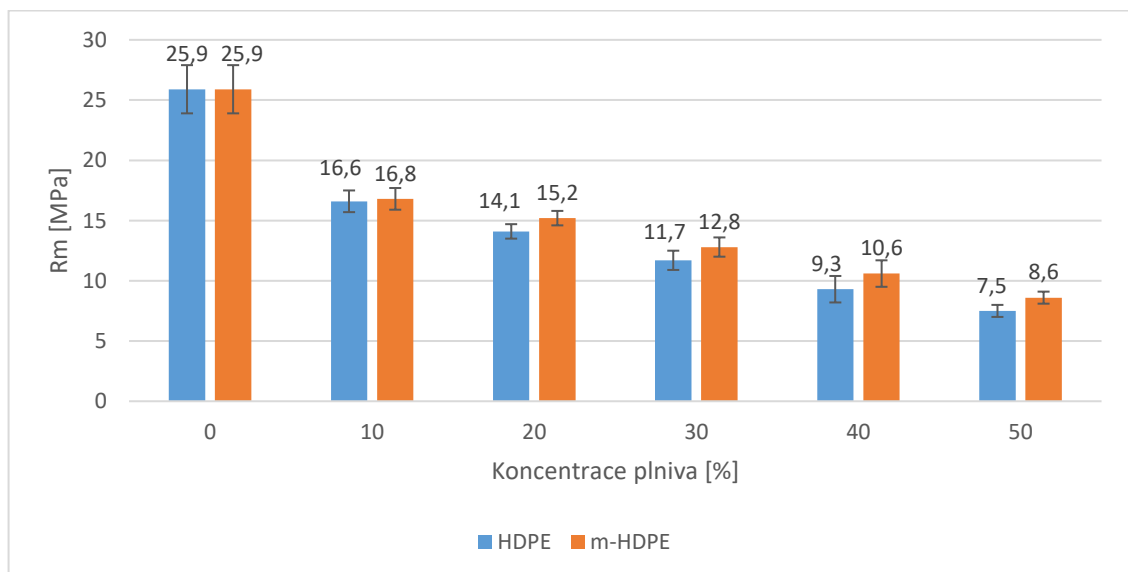
Z Obr. 32 lze zjistit, že tak jako u m-HDPE, i zde není zcela jasný trend. Modul E se sice s množstvím plniva zvyšuje (do 30 %), ale u 40% koncentrace hodnota klesá. Pro nejvyšší koncentraci pak modul opět znovu roste. Nejnižší hodnota modulu E je pro čistý polymer a nejvyšší pro 50% zastoupení plniva.



Obr. 32 Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – m-LDPE

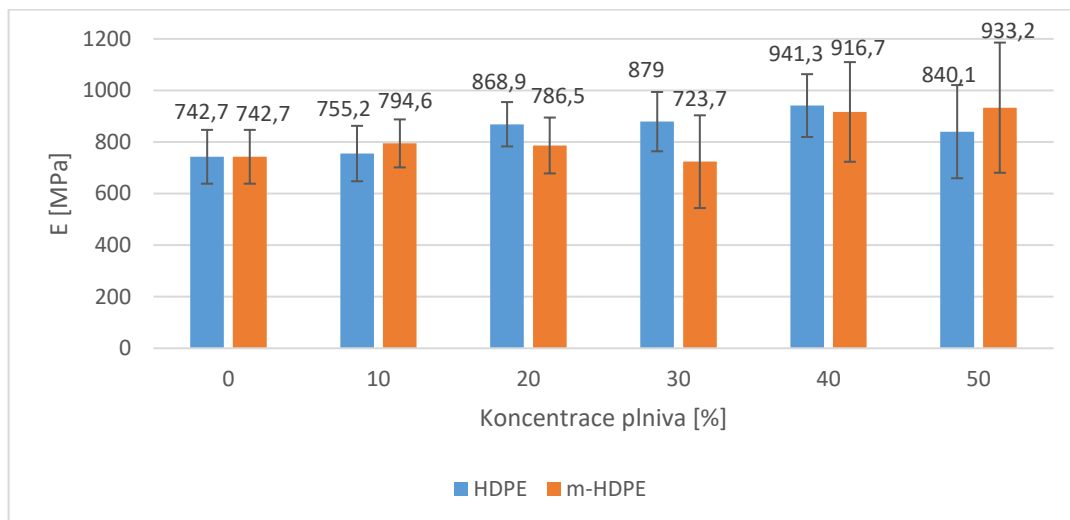
8.1.6 Vliv maleinizace na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-HDPE

Jako referenční materiál (0 % plniva) je v grafu uveden čistý HDPE. Z Obr. 33 je zřejmé, že přidáním maleinizovaného systému dojde ke zvýšení hodnot parametru R_m pro všechny koncentrace plniva. Další poznatek je ten, že maleinizace pomáhá zvyšovat parametr R_m tím více, čím vyšší je koncentrace plniva – 1, 7, 9, 12, 13 % (procentuální zlepšení postupně od 10 po 50% zastoupení plniva).



Obr. 33 Vliv maleinizace na mez pevnosti v tahu – HDPE

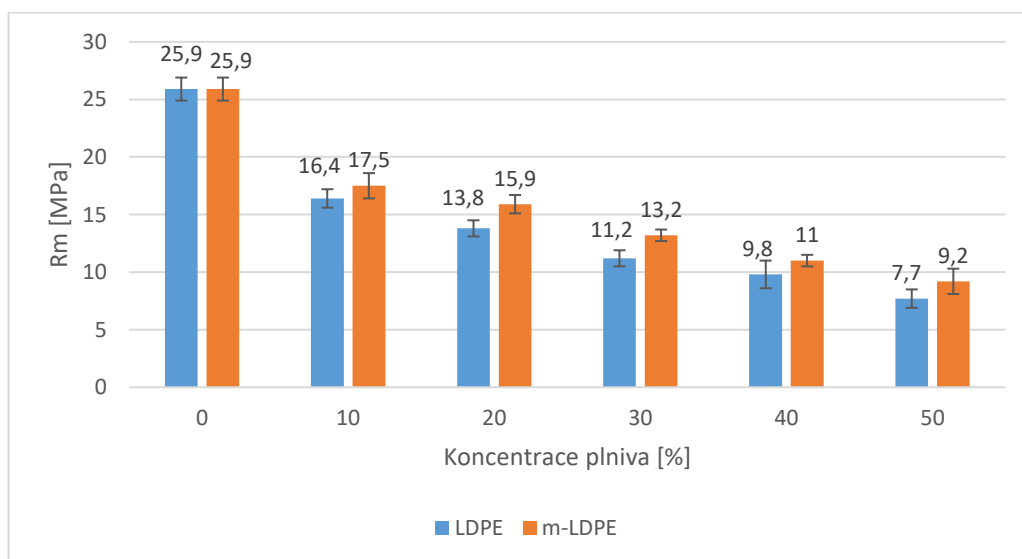
Na Obr. 34 lze vidět, že přidáním maleinizovaného PE se modul E nezmění natolik, aby byl jasně viditelný trend. Lze však konstatovat, že maleinizovaný systém posunul maximální hodnotu modulu E na 50% koncentraci plniva (u základních směsí je maximum na 40 %).



Obr. 34 Vliv maleinizace na modul pružnosti v tahu – HDPE

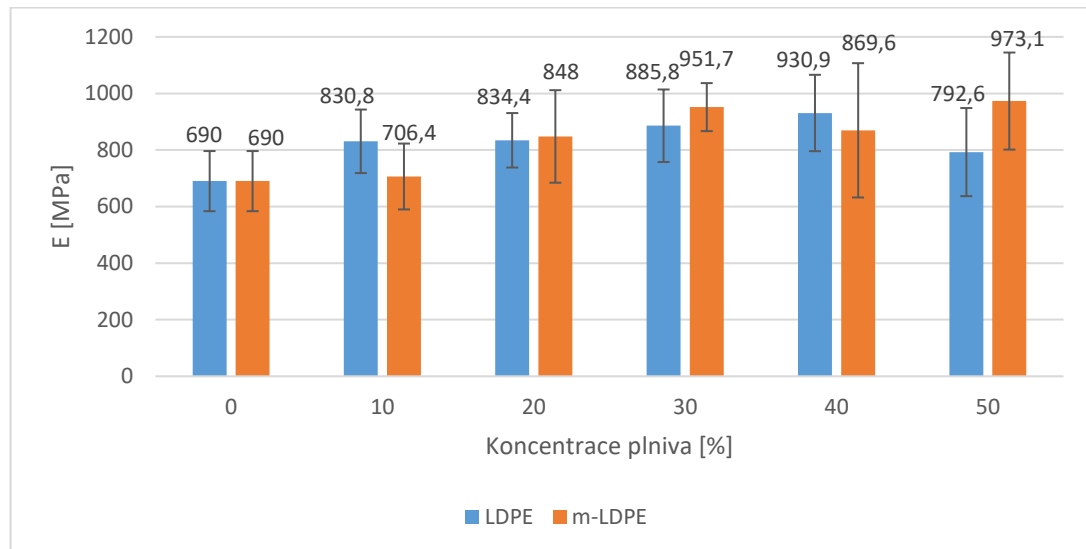
8.1.7 Vliv maleinizace na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-LDPE

Jako referenční materiál (0 % plniva) je v grafu uveden čistý LDPE. Směs LDPE s maleinizovaným PE má vyšší hodnoty parametru R_m pro všechny koncentrace plniva. Čím vyšší je zastoupení plniva, tím lepší efekt má maleinizovaný systém na zlepšení parametru R_m (u 40% koncentrace mírný pokles) – 6, 13, 15, 11, 16 % (jedná se o hodnoty jdoucí postupně od 10 po 50% obsah plniva). Při srovnání Obr. 33 a Obr. 35 je zřetelné, že hodnoty meze pevnosti jsou vyšší pro směs m-LDPE.



Obr. 35 Vliv maleinizace na mez pevnosti v tahu – LDPE

Podobně jako u směsí m-HDPE, ani zde není jasně viditelný trend – Obr. 36. Přidáním maleinizovaného systému se však posune maximální hodnota modulu E na koncentraci 50 % (základní směs měla maximum na 40 % obsahu plniva).



Obr. 36 Vliv maleinizace na modul pružnosti v tahu – LDPE

8.1.8 Shrnutí výsledků tahové zkoušky

Z tahové zkoušky lze vyvodit následující závěry:

- Se zvyšující se koncentrací plniva se mez pevnosti R_m snižuje – max. hodnoty pro čistý polymer, minimální pro nejvyšší zastoupení plniva.
- Pokles parametru R_m je při použití nejnižší koncentrace plniva téměř u všech směsí kolem 35 %. Tak velký skok byl v rámci experimentu překvapivým zjištěním (odhad byl ± 10 %). Kvůli tomu, se PUR odpad nejvíce jako vhodné plnivo při tak nízké koncentraci (v rámci výrobků, které podléhají zvýšenému namáhání).
- U základních směsí se modul pružnosti v tahu zvyšuje až do 40% obsahu plniva, a pak klesá. Minimální hodnoty jsou u čistého polymeru, maximální pro 40% koncentraci plniva – platí pro všechny základní směsi.
- Maleinizace má pozitivní vliv na parametr R_m , který je vyšší u všech koncentrací. Při porovnání m-LDPE a m-HDPE má maleinizace větší účinek pro m-LDPE.
- U modulu E maleinizace nijak výrazně neovlivnila výsledek, posunula však maximální hodnotu modulu pro obě směsi na koncentraci 50 %. U m-HDPE došlo k posunu minimální hodnoty tohoto parametru na 30% obsah plniva (všechny ostatní směsi u 0% plnění).

8.2 Vliv teplotního zatížení

Vzorky jednotlivých směsí byly následně podrobeny teplotní zátěži. Cílem tohoto testu bylo zjistit, jestli dojde k nějakým změnám pro námi vytvořený kompozit, ať už se jedná o změny estetické, chemické, případně změny mechanických vlastností. Teplotnímu zatížení bylo podrobena 10 vzorků od každé koncentrace u všech směsí. Pro tento experiment byla zvolena laboratorní sušárna, která byla nastavena na 60 °C a doba teplotní zátěže byla zvolena na 24 h.

Následně byly vzorky proměřeny na zařízení FT-IR ATR Nicolet – *Obr. 37*. Pokud by došlo k chemickým změnám vlivem teplotního zatížení, záznamy z FTIR zařízení se musí značně lišit (pík by chyběl, nebo se vytvořil na novém místě apod.) Po měření na FTIR byly vzorky znovu podrobeny tahové zkoušce, z důvodu ověření, jestli nedošlo ke změně mechanických vlastností. Pokud nedojde k chemickým změnám, je málo pravděpodobné, že by vlivem teplotního zatížení došlo ke změně vlastností mechanických. Jelikož se však jedná o kompozitní materiál, bylo v našem zájmu zjistit, jestli by tímto procesem nedošlo naopak ke zlepšení mechanických vlastností (odstranění vnitřního pnutí atd.). FTIR test lze tedy brát jako test z hlediska chemických změn, opětovnou zkoušku tahem z hlediska mechanických změn.

Z důvodu velkého množství vzorků byla FTIR analýze podrobena pouze nejvyšší/nejnižší koncentrace a čistý polymer. Tahová zkouška pak proběhla u všech koncentrací a směsí. Teplotně zatížený vzorek je označen koncovkou -T.

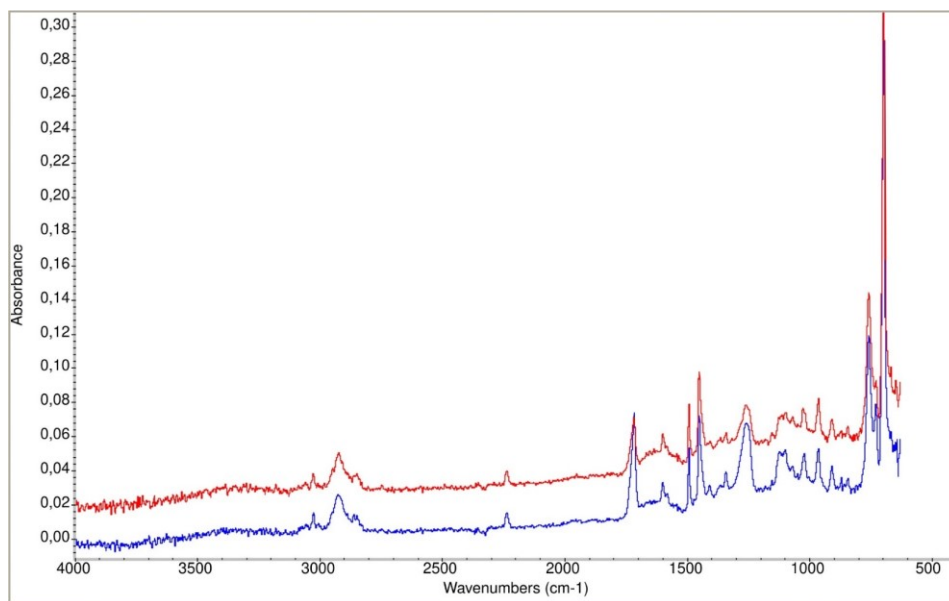


Obr. 37 Zařízení FT-IR ATR Nicolet

8.2.1 Vliv teplotního zatížení na chemické změny – ABS

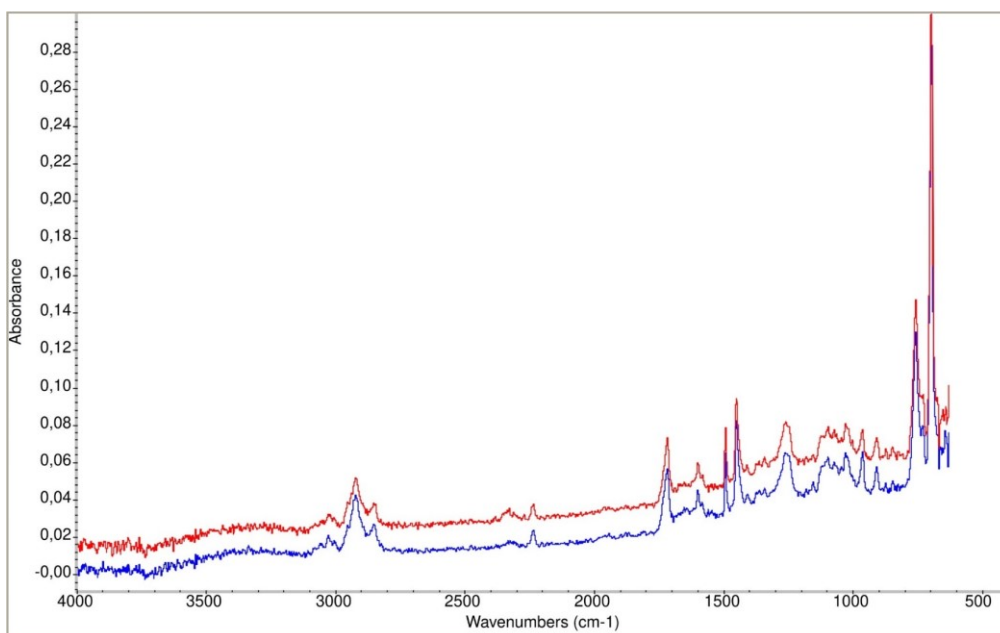
Teplotně zatížený vzorek je reprezentován červenou křivkou, nezatížený modrou. Ze záznamů na *Obr. 38*, *Obr. 39* a *Obr. 40* vyplývá, že teplotní zatížení nemá pro směsi ABS vliv z hlediska chemických změn.

- Čistý polymer:



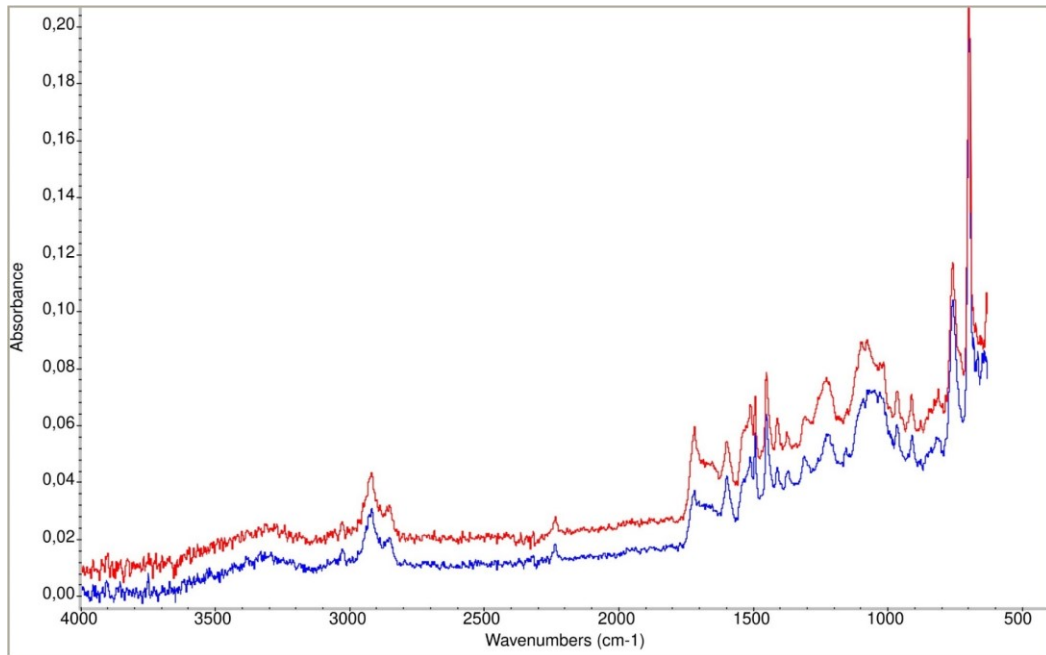
Obr. 38 FTIR záznam – čistě ABS

- 10% koncentrace plniva:



Obr. 39 FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – ABS

- 50% koncentrace plniva:

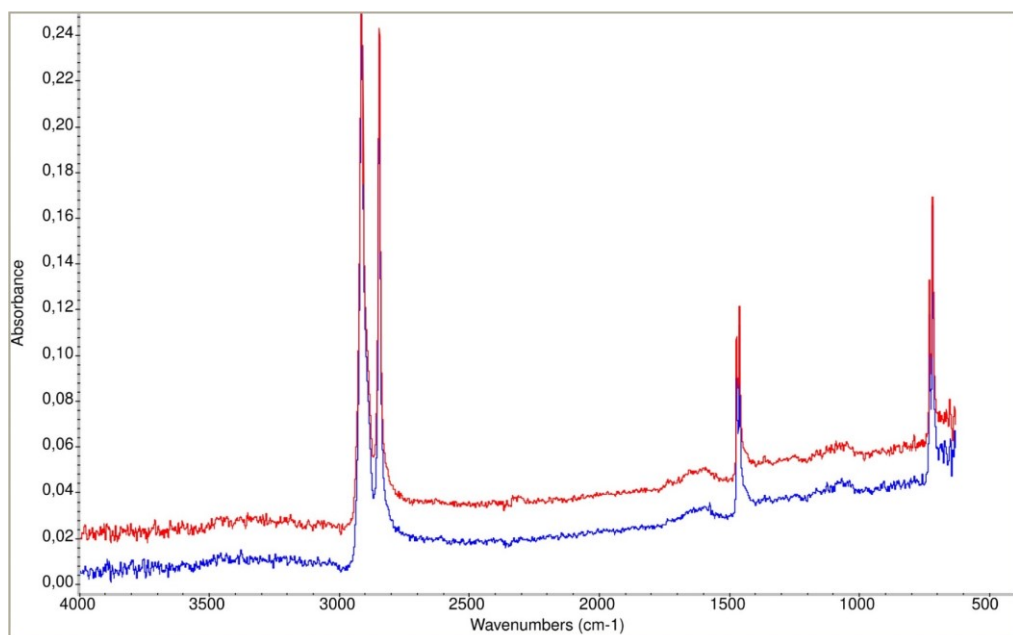


Obr. 40 FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – ABS

8.2.2 Vliv teplotního zatížení na chemické změny – LDPE

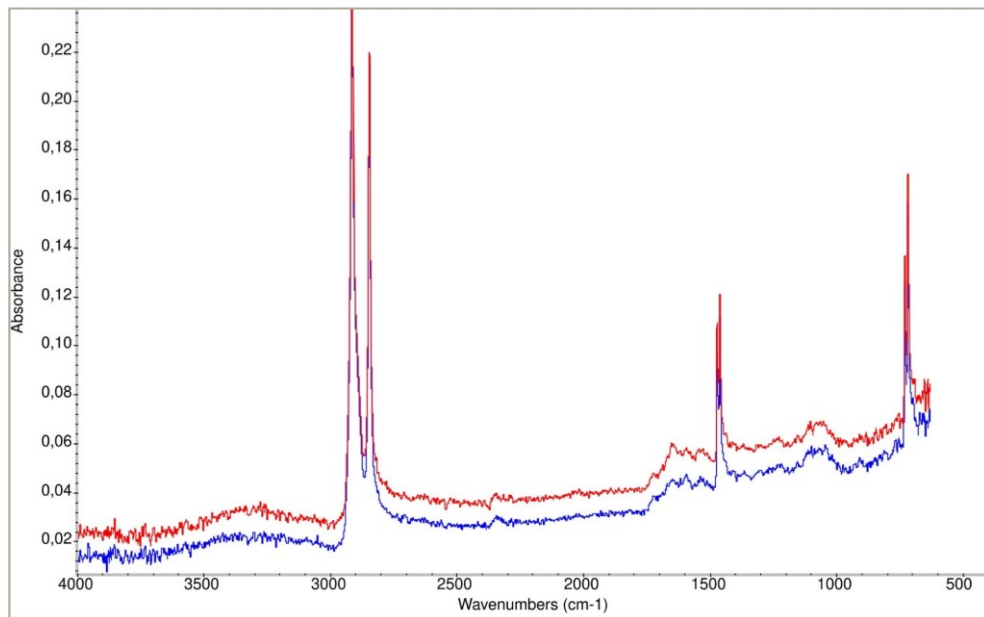
Teplotně zatížený vzorek je reprezentován červenou křivkou, nezatížený modrou. Uvedené záznamy z *Obr. 41*, *Obr. 42* a *Obr. 43* potvrzují, že teplotní zatížení nemá pro směsi LDPE vliv z hlediska chemických změn.

- Čistý polymer:



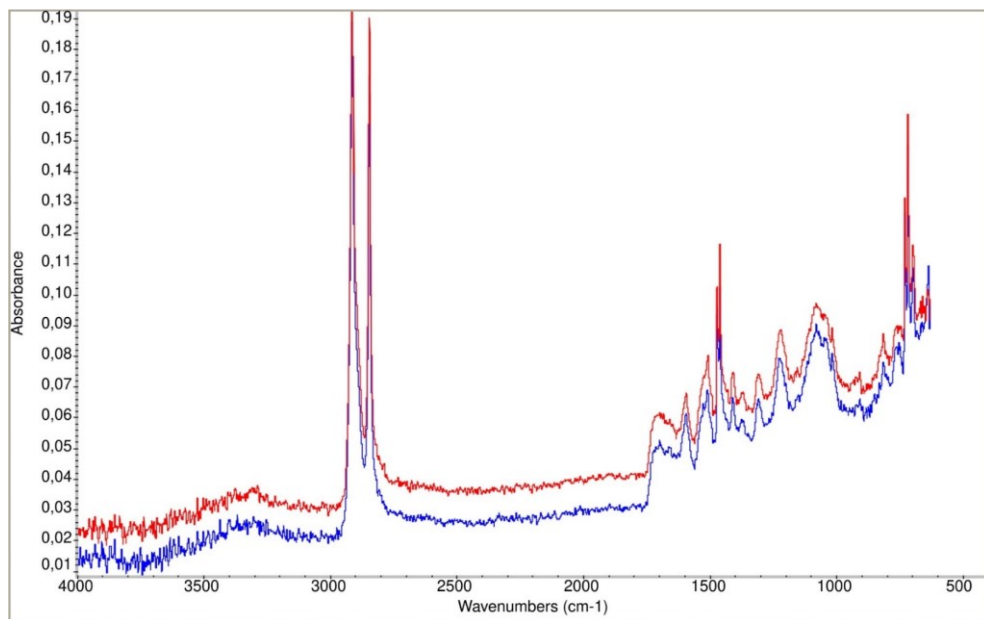
Obr. 41 FTIR záznam – čisté LDPE

- 10% koncentrace plniva:



Obr. 42 FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – LDPE

- 50% koncentrace plniva:

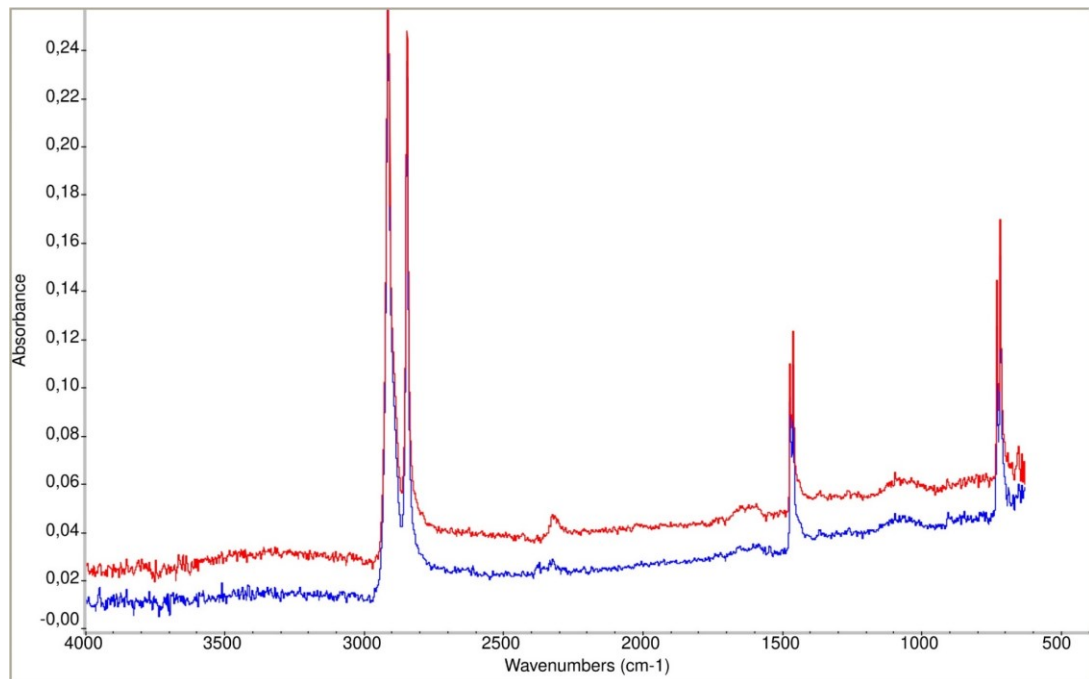


Obr. 43 FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – LDPE

8.2.3 Vliv teplotního zatížení na chemické změny – HDPE

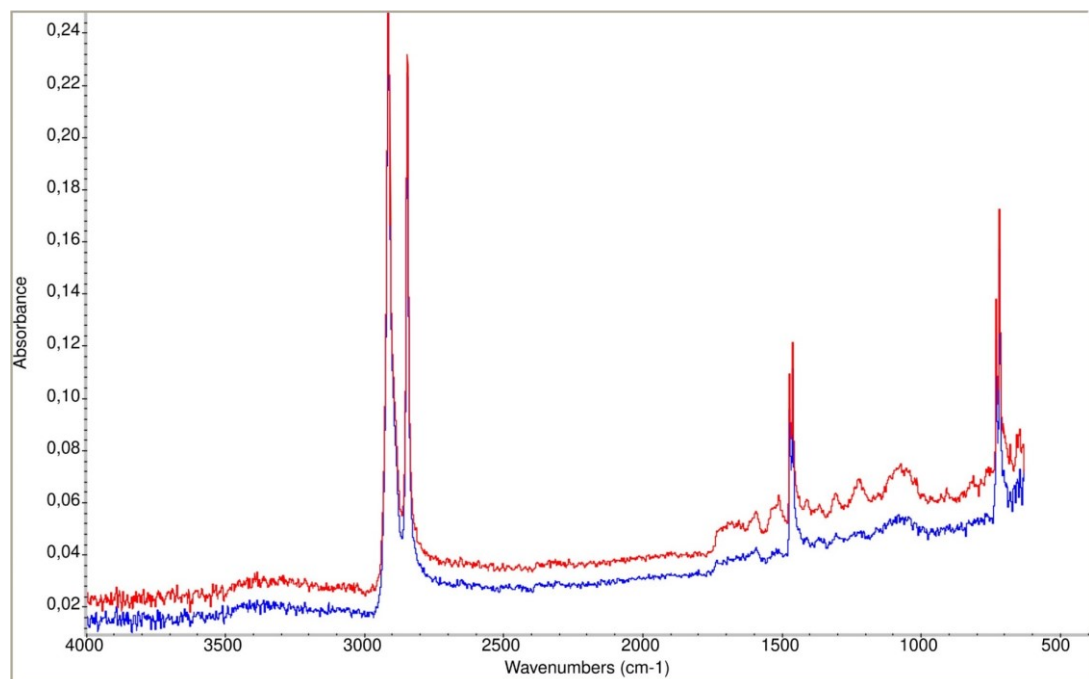
Teplotně zatížený vzorek je reprezentován červenou křivkou, nezatížený modrou. Ze záznamů na *Obr. 44*, *Obr. 45* a *Obr. 46* pro směs HDPE lze vyvodit, že teplotní zatížení nemá pro tyto směsi vliv z hlediska chemických změn.

- Čistý polymer:



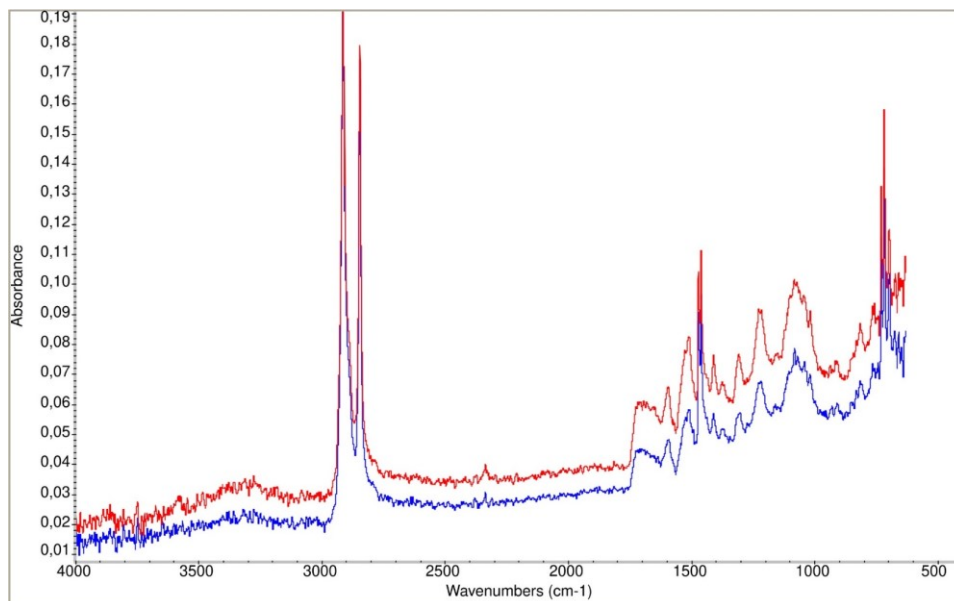
Obr. 44 FTIR záznam – čisté HDPE

- 10% koncentrace plniva:



Obr. 45 FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – HDPE

- 50% koncentrace plniva:

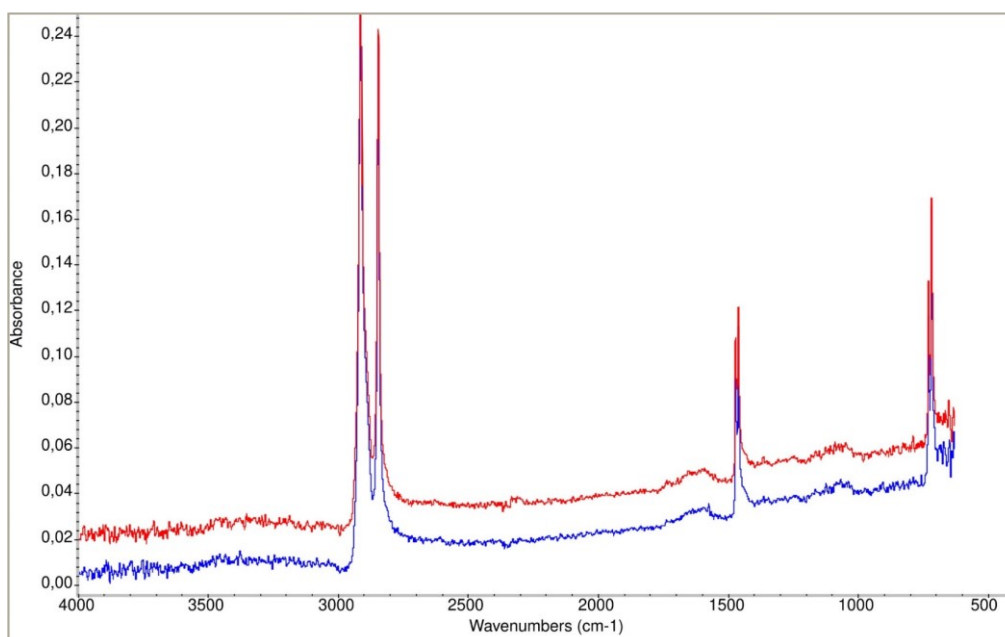


Obr. 46 FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – HDPE

8.2.4 Vliv teplotního zatížení na chemické změny – m-LDPE

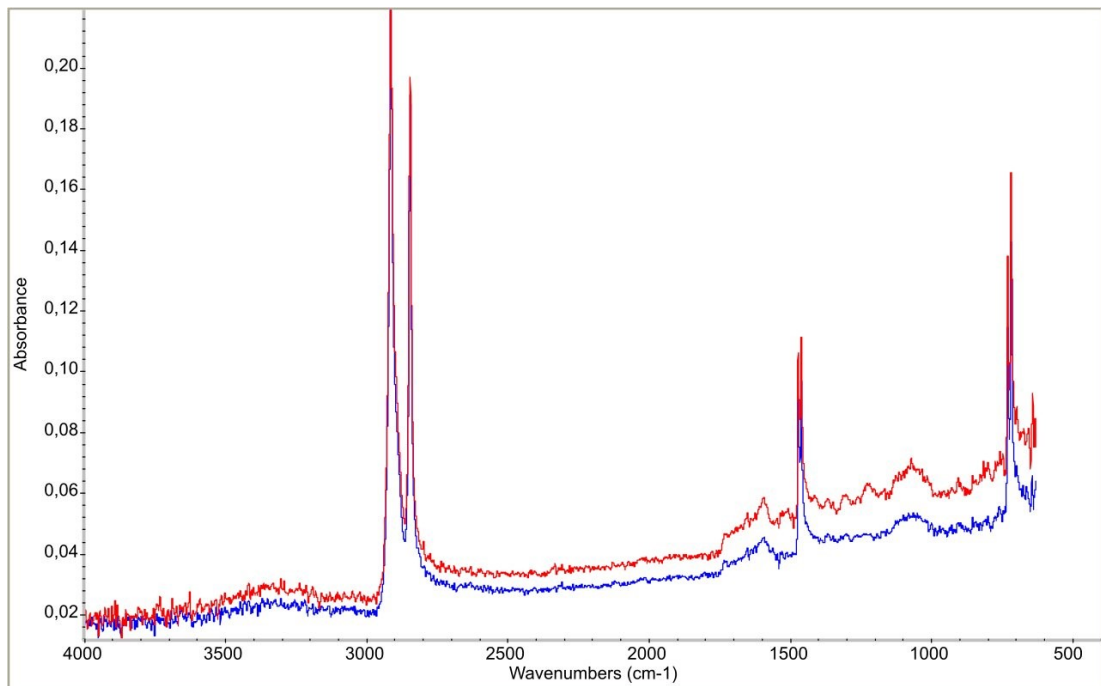
Teplotně zatížený vzorek je reprezentován červenou křivkou, nezatížený modrou. Čistý polymer je u směsi m-LDPE brán jako LDPE. FTIR záznamy pro směs m-LDPE potvrzují, že při teplotním zatížení nedošlo k žádným chemickým změnám – *Obr. 47, Obr. 48 a Obr. 49.*

- Čistý polymer:



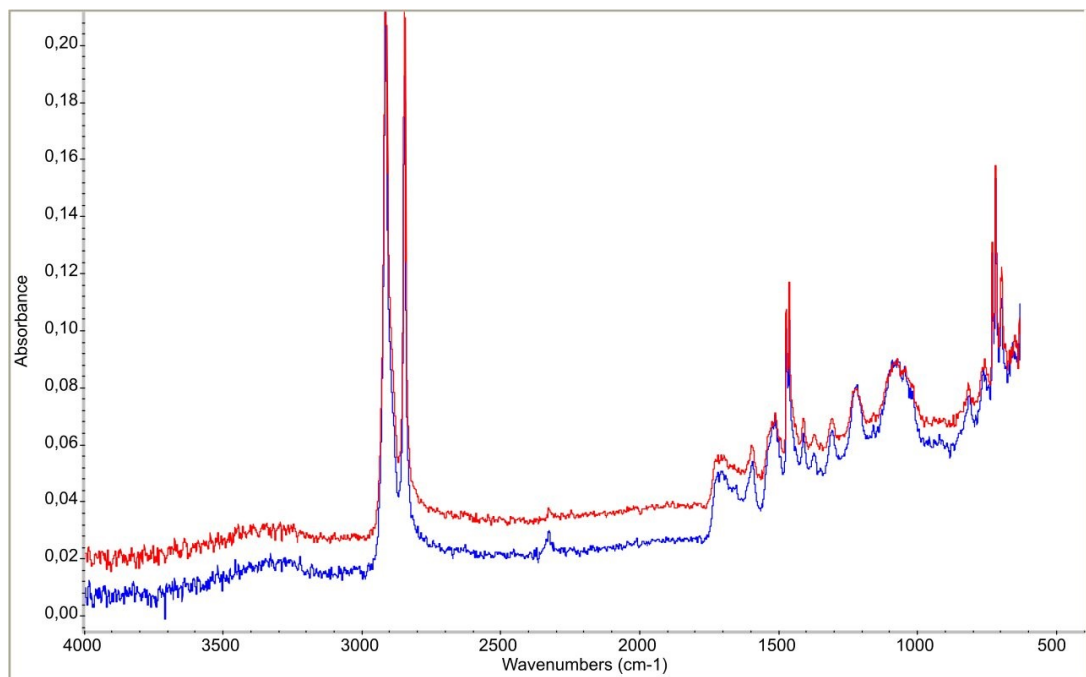
Obr. 47 FTIR záznam – čisté LDPE

- 10% koncentrace plniva:



Obr. 48 FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – m-LDPE

- 50% koncentrace plniva:

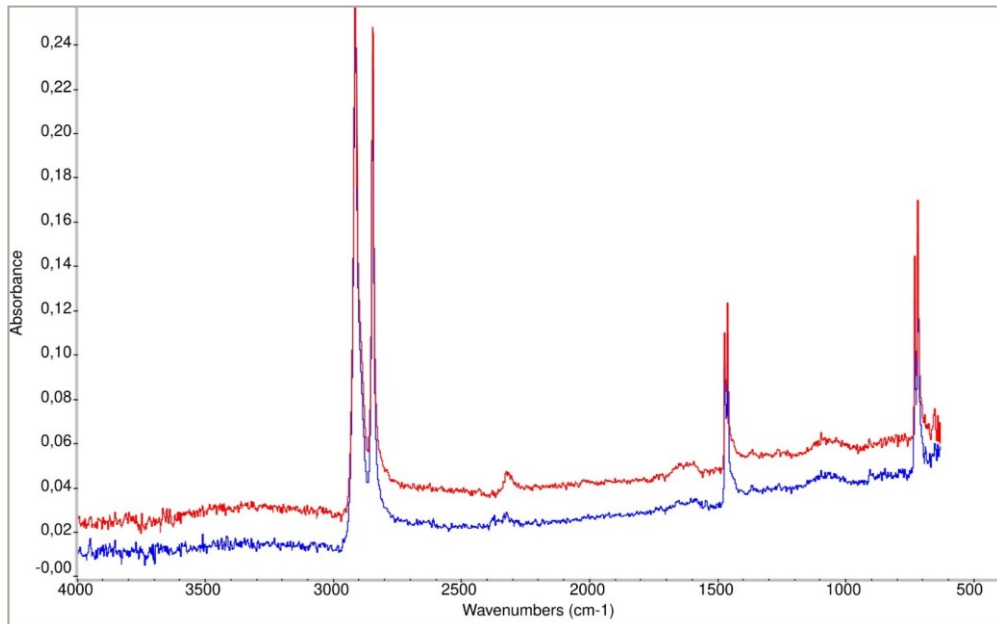


Obr. 49 FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – m-LDPE

8.2.5 Vliv teplotního zatížení na chemické změny – m-HDPE

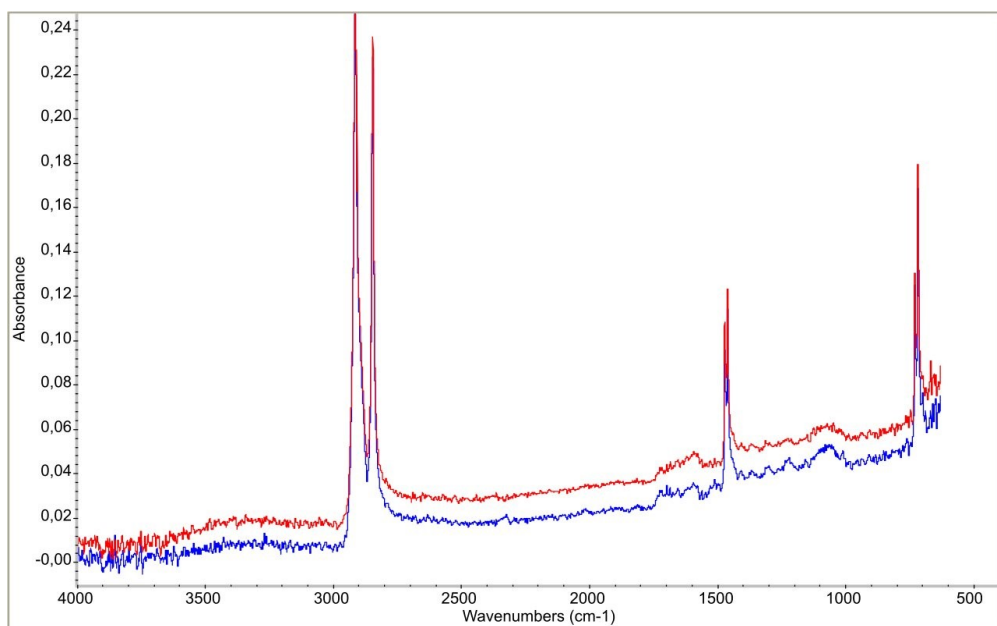
Teplotně zatížený vzorek je reprezentován červenou křivkou, nezatížený modrou. Čistý polymer je u směsi m-HDPE brán jako HDPE. Záznamy z měření směsí m-HDPE poukazují na skutečnost, že při teplotním zatížení nebyla patrná žádná chemická změna v materiálu – *Obr. 50, Obr. 51 a Obr. 52.*

- Čistý polymer:



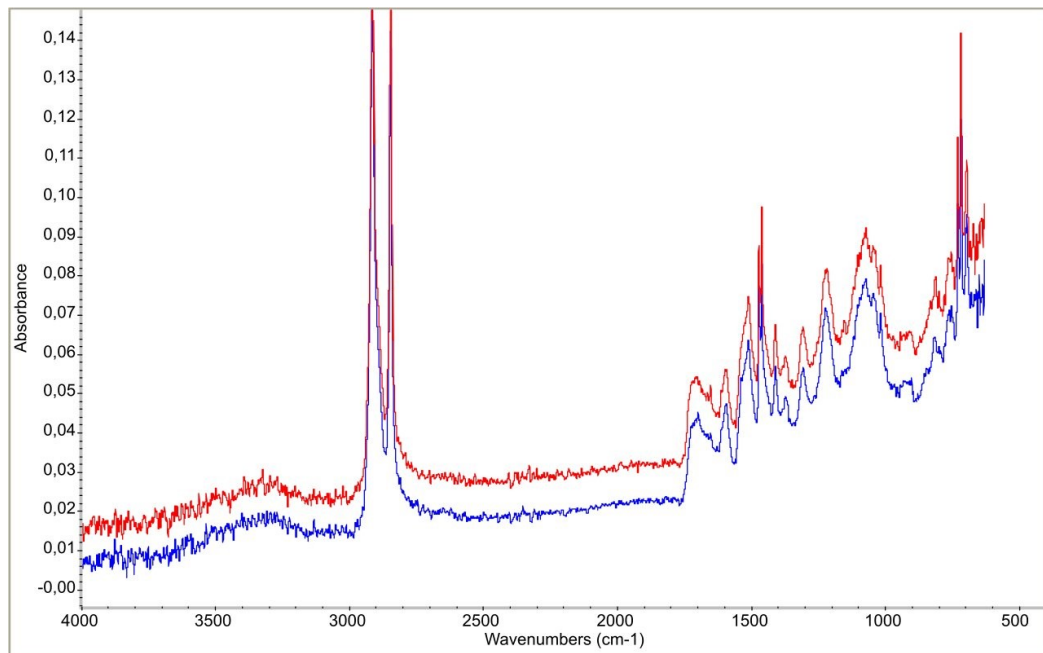
Obr. 50 FTIR záznam – čisté HDPE

- 10% koncentrace plniva:



Obr. 51 FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – m-HDPE

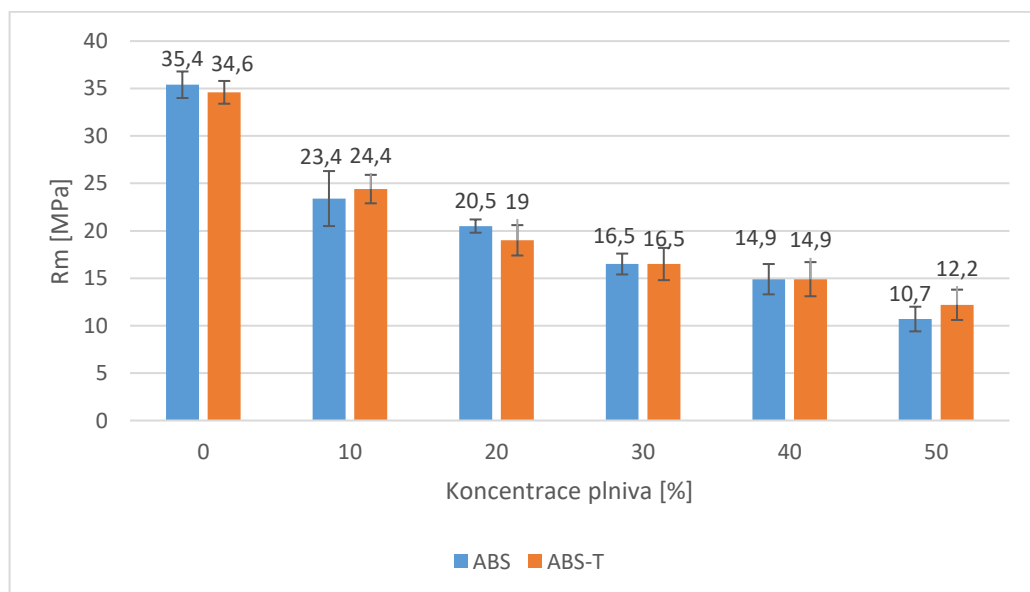
- 50% koncentrace plniva:



Obr. 52 FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – m-HDPE

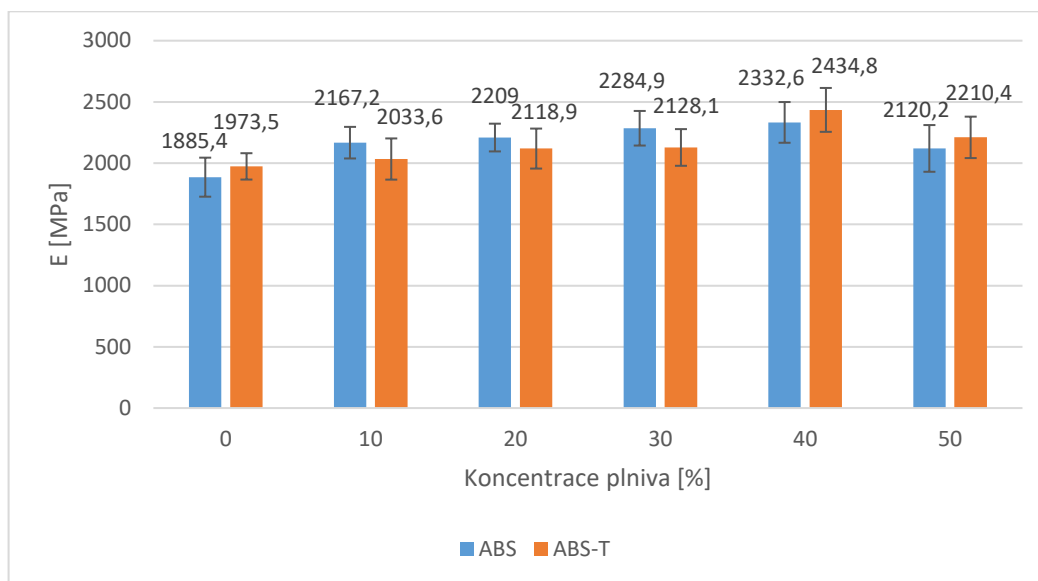
8.2.6 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – ABS

Z Obr. 53 nejsou patrné zásadní změny v hodnotách oproti nezatížené směsi. Trend zůstává stejný jako pro základní směs. Teplotní zatížení tedy nemá vliv na mez pevnosti v tahu pro danou směs.



Obr. 53 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – ABS

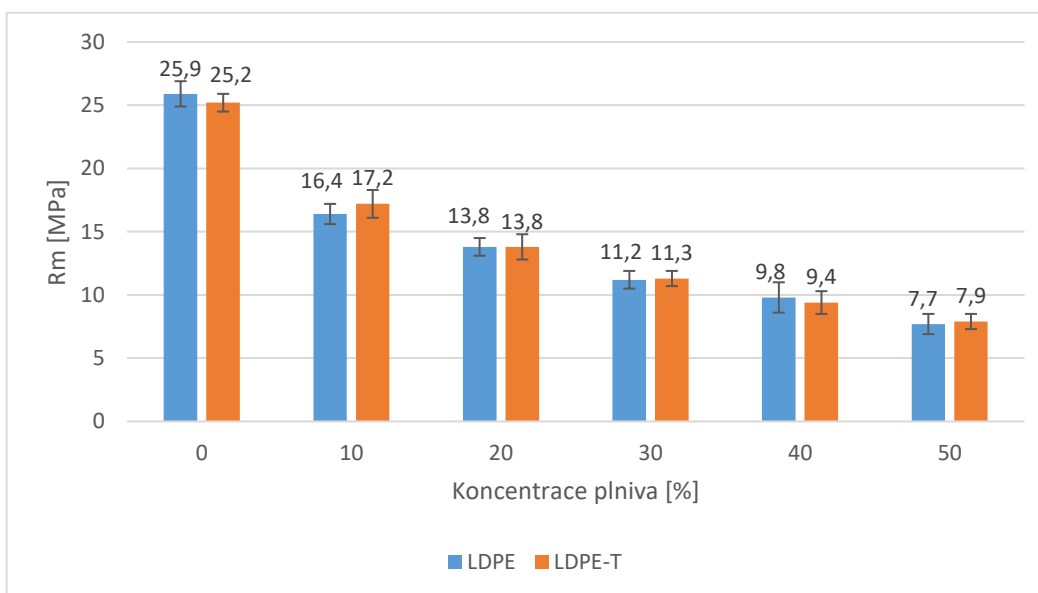
Pro modul E nejsou pozorovatelné změny – Obr. 54, které by se odchylovaly od předchozího trendu. Podobně jako trend, ani hodnoty se nijak zásadně neliší.



Obr. 54 Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti v tahu – ABS

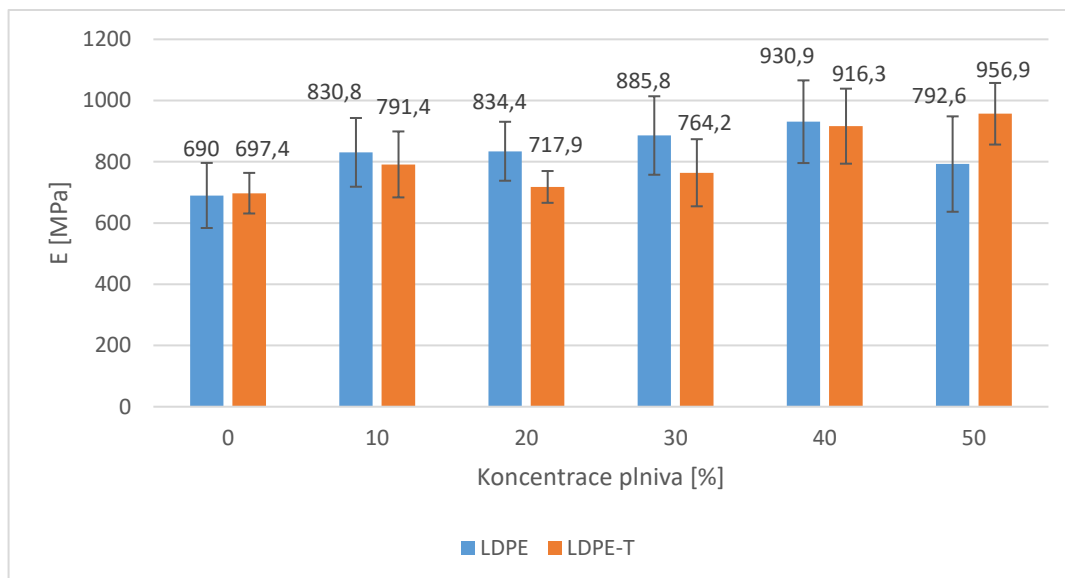
8.2.7 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – LDPE

Hodnoty parametru R_m se pro teplotně zatížené vzorky zásadně nemění, kopírují trend základní směsi LDPE a lze s jistotou říct, že teplotní zatížení nemá na mez pevnosti v tahu pro LDPE vliv – Obr. 55.



Obr. 55 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – LDPE

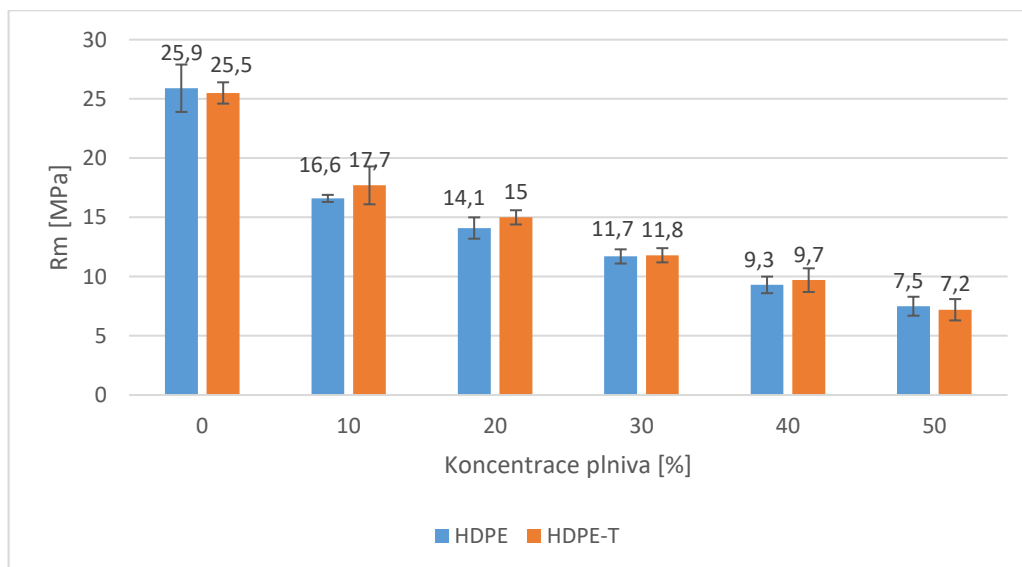
Trend modulu E pro teplotně zatížené vzorky nekoresponduje s trendem vzorků nezatížených – Obr. 56. Hodnota se u 20% koncentrace propadá, a posléze zase stoupá – u nezatížených vzorků je tento pokles až u 50% koncentrace. Hodnoty modulu E se sice liší více než u předchozích směsí, ale vliv teplotního zatížení na tuto materiálovou vlastnost není prokazatelný.



Obr. 56 Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti v tahu – LDPE

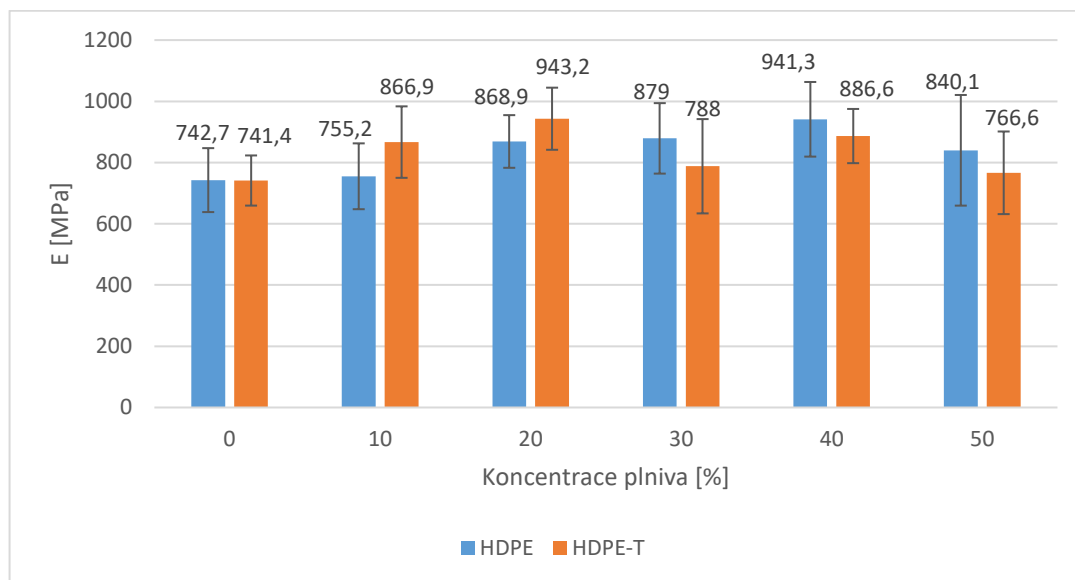
8.2.8 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – HDPE

Jak lze vidět na Obr. 57, hodnoty teplotně zatížených vzorků mají minimální odchylky od vzorků nezatížených, a proto na tento parametr nemá teplotní zatížení vliv. Trend je zachován.



Obr. 57 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – HDPE

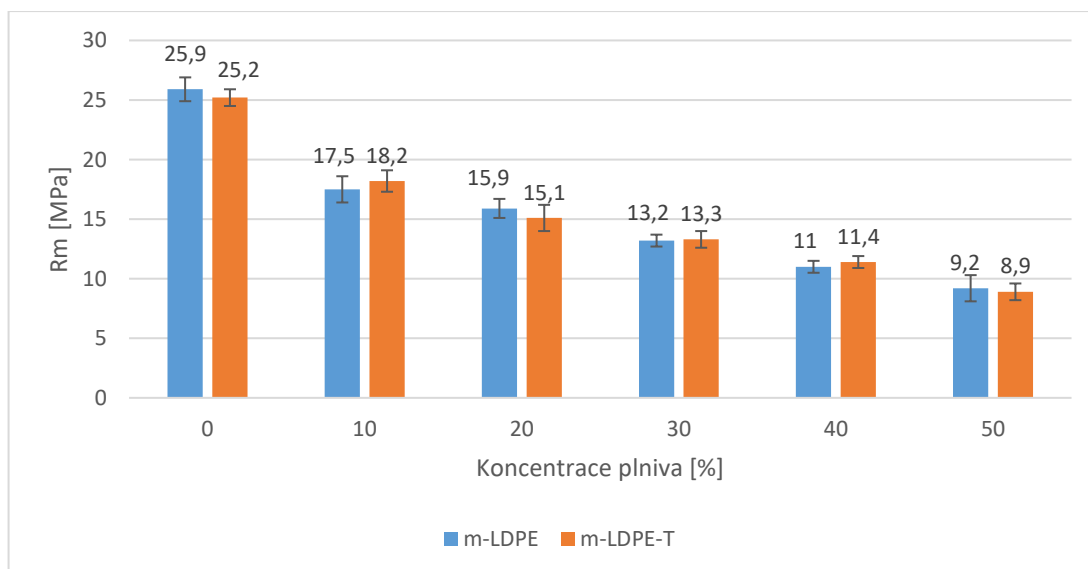
Z Obr. 58 je patrné, že oproti nezatíženým vzorkům dochází ke změně trendu – modul E roste a dosahuje svého maxima u 20 hm. %, následně se střídá pokles, růst a pokles. Ač je změněn trend, hodnoty modulu u HDPE-T se neliší od nezatížených natolik, aby šlo konstatovat, že teplotní zatížení má vliv na modul E .



Obr. 58 Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti v tahu – HDPE

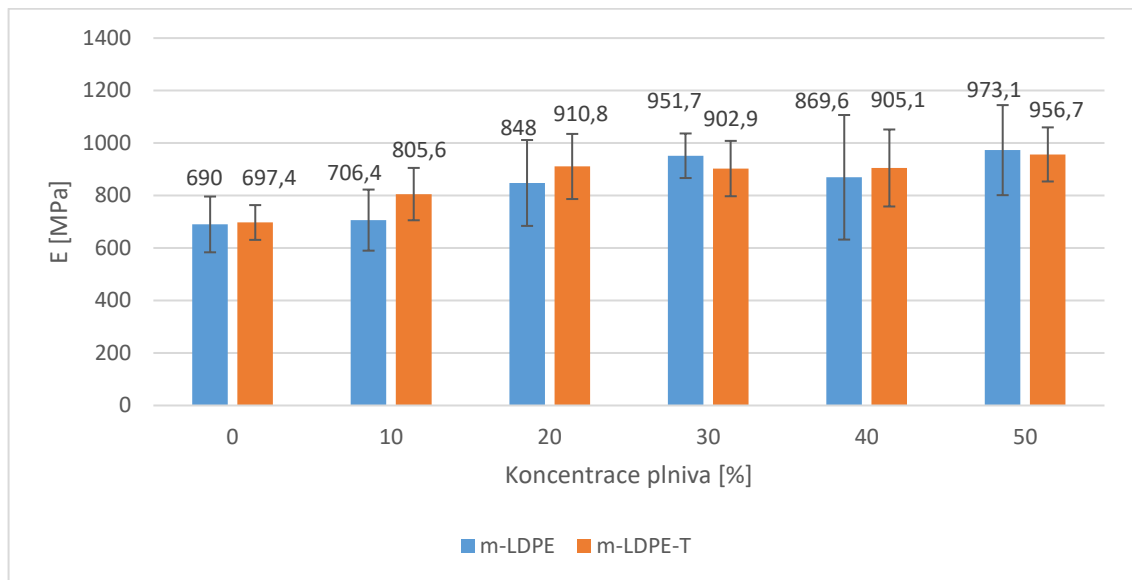
8.2.9 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-LDPE

Podle Obr. 59 lze vyvodit, že teplotní zatížení nemá vliv na parametr R_m . Hodnoty se od nezatížených vzorků mírně liší, nicméně trend, že se zvyšující se koncentrací plniva mez pevnosti klesá, zůstává zachován.



Obr. 59 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – m-LDPE

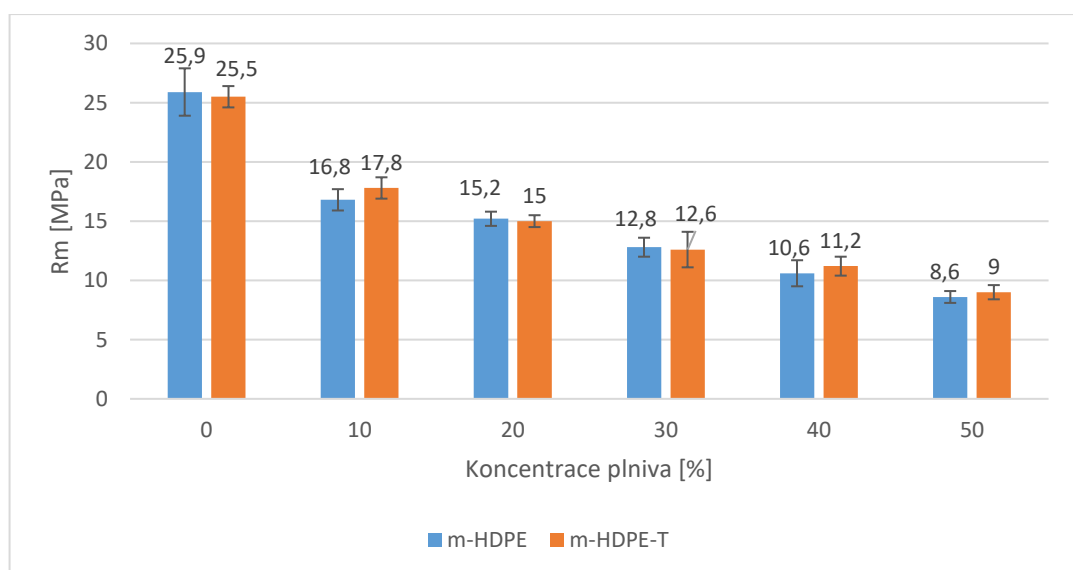
U modulu pružnosti E teplotně zatížených vzorků se parametr E zvyšuje až do 20% koncentrace plniva, poté hodnota klesne, a znovu roste až na své maximum 956,7 MPa. Při detailním prozkoumání však nelze potvrdit, že by mělo teplotní zatížení pro tyto směsi význam – *Obr. 60*.



Obr. 60 Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti v tahu – m-LDPE

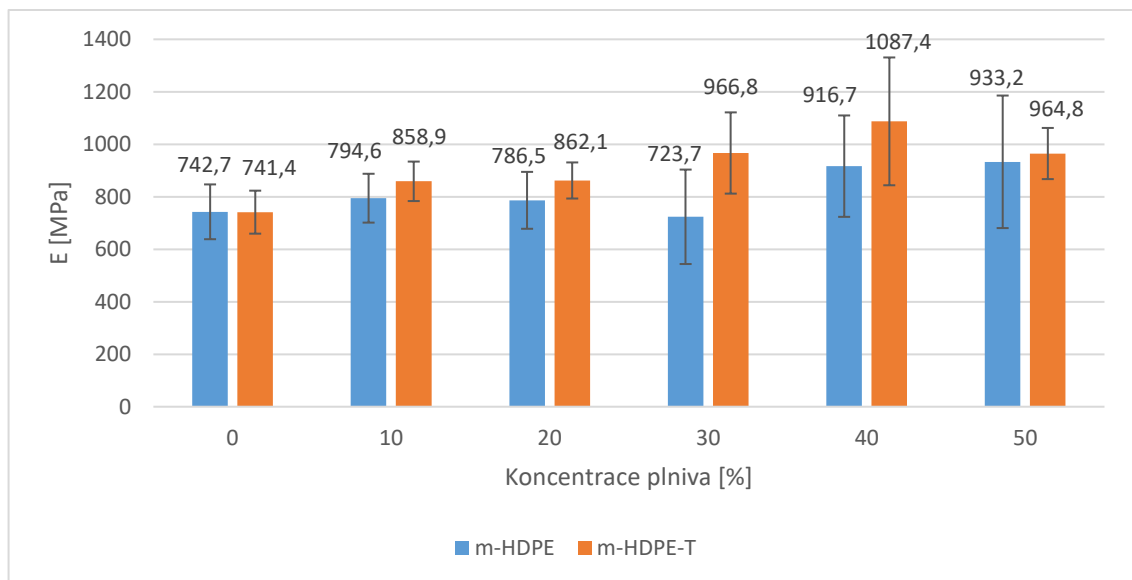
8.2.10 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti a modul pružnosti v tahu – m-HDPE

U parametru R_m pro směs m-HDPE nelze prokázat vliv teplotního zatížení – hodnoty se liší velmi málo a různě se střídají, což lze vidět na *Obr. 61*. Pokles meze pevnosti s rostoucím plněním však zůstává stejný jako u nezatížených vzorků.



Obr. 61 Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – m-HDPE

Na Obr. 62 lze pozorovat značně odlišný vývoj hodnot teplotně zatížených vzorků oproti nezatíženým. Modul E roste až do 40% obsahu plniva, a poté klesá na hodnotu srovnatelnou s 30% obsahem. Zajímavostí je, že tato směs jako jediná dosáhla zvýšení parametru E po teplotním zatížení oproti nezatížené směsi, a to ve všech koncentracích (pokud nepočítáme čistý polymer).



Obr. 62 Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti – m-HDPE

8.2.11 Shrnutí výsledků zkoušek teplotního zatížení

Výsledky zkoušek teplotního zatížení lze rozdělit na 2 části: vliv na chemickou strukturu a vliv na mechanické vlastnosti. Chemické změny byly pozorovány dle výsledků měření na FTIR zařízení a změna mechanických vlastností (resp. 2 parametrů) byla posouzena na opětovné zkoušce tahem.

Vliv teplotního zatížení na chemické změny:

- Grafy zatíženého a nezatíženého vzorku kopírují navzájem svůj průběh. Nedochozí k vytvoření či zániku píků, a tudíž lze s jistotou konstatovat, že námi nastavené teplotní zatížení nemá vliv na chemické změny ve vzorcích, tedy připravené kompozity jsou schopny takovéto teplotní namáhání snést bez degradace a lze je použít i na výrobky, které by takto mohly být namáhané v praxi.
- Jelikož nedošlo k chemickým změnám uvnitř směsí, neměly by se změnit ani mechanické vlastnosti. Tato skutečnost byla ověřena tahovou zkouškou, společně s teorií, že by vzorky mohly projít během teplotní zátěže změnou z hlediska vnitřního pnutí, a tedy své mechanické vlastnosti zlepšit.

Vliv teplotního zatížení na změny parametru Rm a E :

- Výsledky tahové zkoušky potvrzují, že jelikož nedošlo k chemickým změnám, nedošlo ani ke značným změnám mechanických vlastností.
- Výsledky teplotně zatížených vzorků se neliší natolik, aby se potvrdila teorie, že by došlo ke zlepšení mechanických vlastností vlivem odstranění vnitřního pnutí.
- Teplotní zatížení nemá vliv na hodnoty parametru Rm u žádné ze směsí. Trend zůstal stejný jako u vzorků nezatížených – s rostoucí koncentrací plniva se hodnota Rm snižuje.
- U modulu E nebyl zjištěn vliv teplotního zatížení u žádné ze směsí, až na m-HDPE. Zde byly hodnoty parametru E vyšší od 10% až po 50% koncentraci plniva.

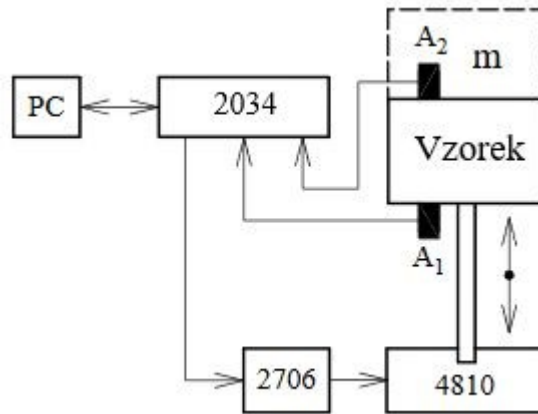
8.3 Měření rezonanční frekvence

Cílem tohoto experimentu bylo ověřit, jestli rezonanční frekvence souvisí s modulem pružnosti v tahu E . Pokud ano, jednalo by se o nedestruktivní metodu pro měření tohoto parametru. Tento způsob měření modulu E by nám sice nepředal přesnou číselnou hodnotu, nicméně by byl pro srovnání různých materiálů postačující – při otázce: „Který ze dvou vzorků má vyšší tuhost? Resp. modul pružnosti v tahu?“ by byla odpověď jasná. Jelikož by se jednalo o nedestruktivní metodu měření, nebylo by potřeba vytvářet velké množství vzorků a ušetřil by se čas s přípravou experimentu. Pokud by však byla vyžadována přesná hodnota modulu E , muselo by se přejít ke klasické zkoušce tahem.

Měření rezonanční frekvence úzce souvisí s měřením přenosového útlumu, který vyjadřuje schopnost materiálu tlumit vibrace. U vzorků byl tedy měřen přenosový útlum, a následně byla z dat odečtena rezonanční frekvence – jedná se o frekvenci, při které dochází k největšímu zesílení kmitů. Podrobněji je tato problematika popsána v kapitole 5.3.

Důvodem, proč není v rámci experimentu zahrnut samotný přenosový útlum je následující – měření tohoto parametru je velmi závislé na několika faktorech jako jsou: tloušťka materiálu a jeho typ, frekvence kmitů, zatížení, rovinnost vzorků, poloha snímačů atd. Jelikož měly vzorky malou tloušťku (2 mm) a nebyly dokonale rovné, nemuselo by měření přenosového útlumu při vysokých frekvencích odpovídat. Po konzultaci došlo ke shodě, že pro hledání závislosti mezi rez. frekvencí a modulem E je kvalita vzorků dostačující. V rámci experimentu byly vybrány koncentrace plniva tak, aby byla závislost frekvence a modulu E co nejlépe viditelná.

Měření probíhalo na zařízení, které je složeno z více komponentů od výrobce Brüel & Kjær – typ zařízení je v závorce. Schéma tohoto přístroje je na *Obr. 63*. Sestavu tvoří budící vibrátor (4810), zesilovač (2706), analyzátor (2034), počítač pro uložení a vyhodnocení naměřených dat (PC), snímače (A_1 , A_2) a zátěž (m). Zátěž činila 90 g.

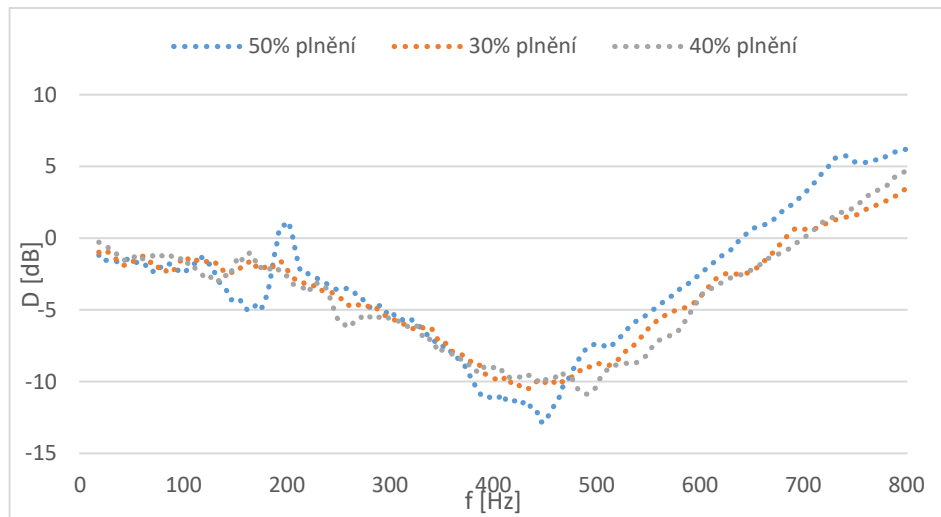


Obr. 63 Schéma zapojení zařízení pro měření přenosového útlumu [32]

Každý z následujících grafů ukazuje závislost přenosového útlumu D na frekvenci f . Záporné hodnoty D odpovídají určité rezonanční frekvenci. Nejnižší hodnota přenosového útlumu pak poukazuje na hledanou rezonanční frekvenci. Rezonancí může být víc, a tedy se může nejnižší výsledek parametru D nacházet v druhé/třetí rezonanci. Pro nás je ale důležitá první rezonanční frekvence.

8.3.1 Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – ABS

Na *Obr. 64* lze vidět, že každá z křivek má nejmenší hodnotu přenosového útlumu u jiné frekvence. Pokud vezmeme v potaz pouze první rezonanční frekvenci (nejmenší hodnota D u modré křivky je kolem 430 Hz, jedná se ale o druhou rezonanci), lze společně s *Tab. 7* vidět, že se zvyšujícím se modulem pružnosti rezonanční frekvence roste.



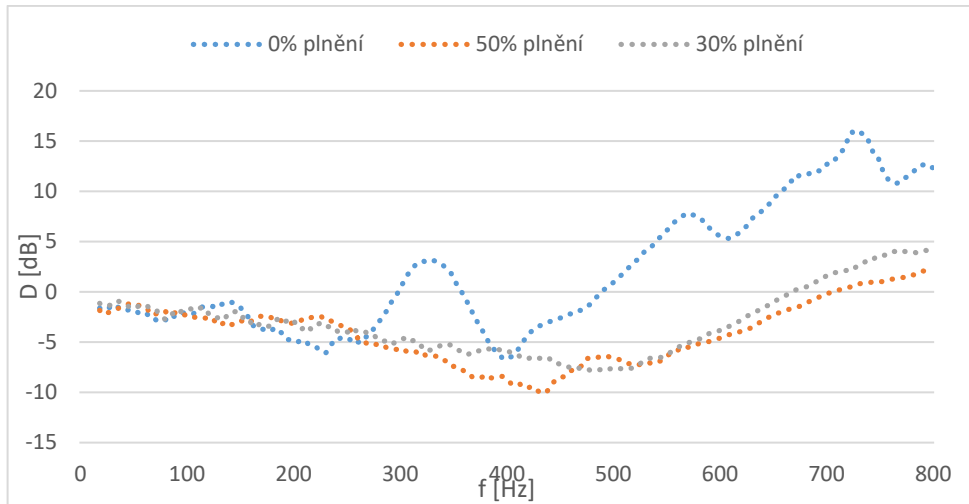
Obr. 64 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – ABS

Tab. 7 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E

Koncentrace plniva [%]	Rez. frekvence [Hz]	Modul E [MPa]
50	180	2120,2
30	426	2284,9
40	490	2332,6

8.3.2 Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – LDPE

U 0% plnění lze opět pozorovat 2 rezonance, přičemž první je zároveň místem s nejnižším přenosovým útlumem, a tedy se zapsala příslušící frekvence, viz *Obr. 65*. Výsledky z grafického vyobrazení jsou v *Tab. 8*. Z tabulky a grafu lze vyčíst, že s rostoucím modulem E roste také rezonanční frekvence.



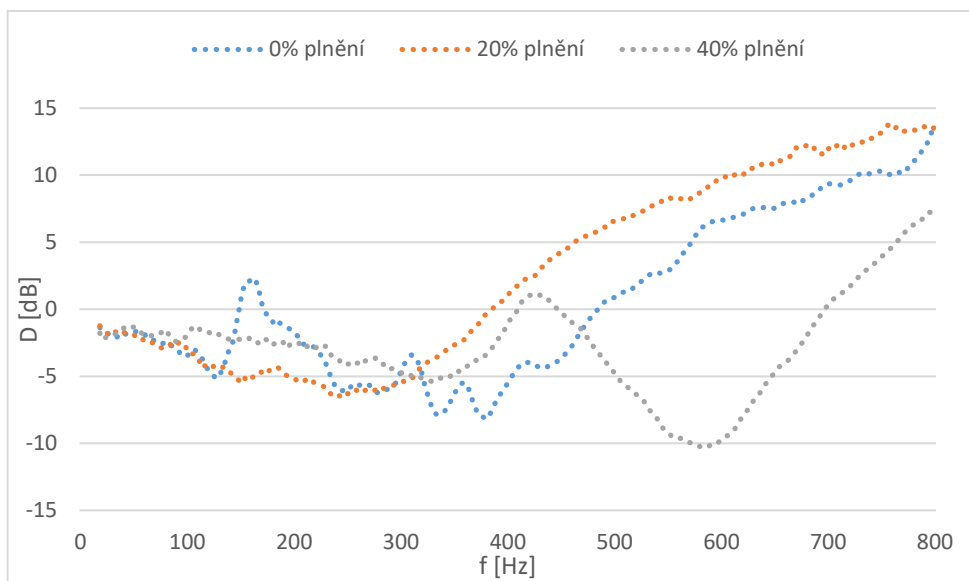
Obr. 65 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – LDPE

Tab. 8 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E

Koncentrace plniva [%]	Rez. frekvence [Hz]	Modul E [MPa]
0	220	690
50	440	792,6
30	498	885,8

8.3.3 Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – HDPE

Na Obr. 66 lze vidět u 0% obsahu plniva a u 40% obsahu plniva dvě rezonance. I přes tuto skutečnost je pro nás důležitá pouze první rezonance. Z Tab. 9 a příslušného grafu plyne, že se zvyšující se tuhostí vzorků dochází k růstu rezonanční frekvence.



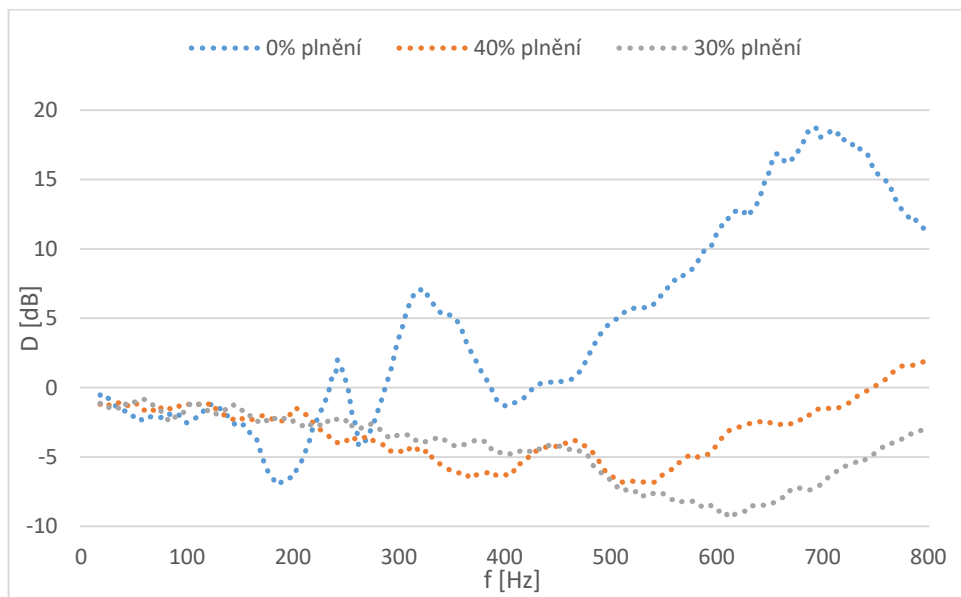
Obr. 66 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – HDPE

Tab. 9 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E

Koncentrace plniva [%]	Rez. frekvence [Hz]	Modul E [MPa]
0	140	742,7
20	250	868,9
40	330	941,3

8.3.4 Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – m-LDPE

U směsi m-LDPE lze opět pozorovat podobný trend jako u předchozích typů vzorků, a tedy že se zvyšujícím se modulem pružnosti v tahu roste také hodnota rezonanční frekvence. Na tuto skutečnost poukazuje Obr. 67 a Tab. 10.



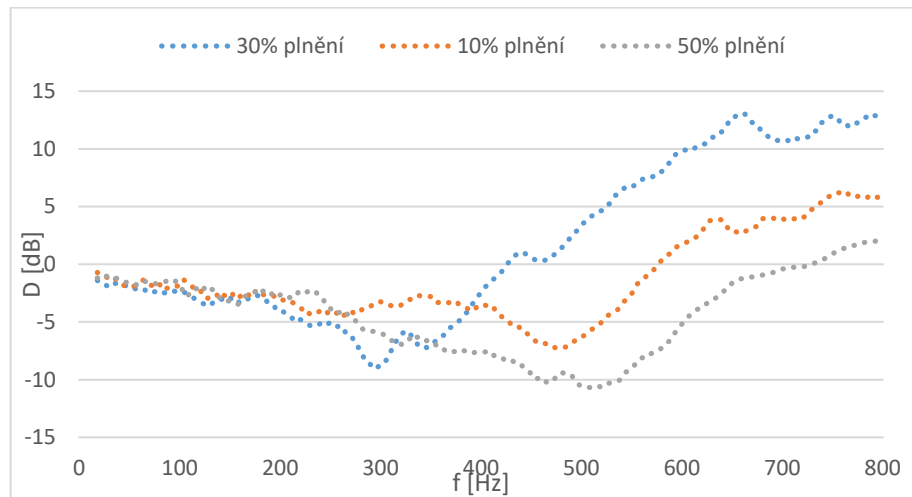
Obr. 67 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – m-LDPE

Tab. 10 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E

Koncentrace plniva [%]	Rez. frekvence [Hz]	Modul E [MPa]
0	190	690
40	390	869,6
30	610	973,1

8.3.5 Souvislost mezi frekvencí a modulem pružnosti v tahu – m-HDPE

Z Obr. 68 a Tab. 11 lze jednoznačně určit, že se zvyšujícím se modulem E dochází ke zvýšení hodnot rezonanční frekvence.



Obr. 68 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – m-HDPE

Tab. 11 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E

Koncentrace plniva [%]	Rez. frekvence [Hz]	Modul E [MPa]
30	296	723,7
10	480	794,6
50	520	933,2

8.3.6 Shrnutí výsledků měření rezonanční frekvence

Cílem tohoto experimentu bylo potvrdit nebo vyvrátit závislost mezi frekvencí (rezonanční) a modulem E . Z výsledků měření plyne:

- S rostoucím modulem pružnosti v tahu E dochází k růstu rezonanční frekvence pro všechny směsi.
- Tuto metodu měření lze použít jako alternativu ke zkoušce tahem, pokud se spokojíme pouze se srovnáním, jaký materiál má větší/menší modul pružnosti, resp. tuhost.

9 EKONOMICKÝ ROZBOR A MOŽNOSTI APLIKACE

Cílem praktické části je také ekonomická rozvaha, která by napomohla určit, jestli se vyplatí vytvářet výrobky s polyuretanovým odpadem jako plnivem. V další části budou navrženy výrobky, které by mohly mít využití na základě zkušeností a námi získaných výsledků.

9.1 Cenový výpočet

Vstupní parametry do výpočtu jsou dva, polyuretanové plnivo a polymer, který tvoří matrici. Součástí toho rozboru nejsou ceny energií a technologií.

Polyuretanový odpad byl dodán firmou Praktik System s.r.o. Jedná se o jemný prášek, který byl získán namletím polyuretanové izolace dveří lednic. Firma z tohoto prášku vyrábí sorbent PURHELP. Podle slov vedoucí logistiky/elektroodpadů Pavly Vitvarové: *„Bohužel, produkce odpadu je vyšší než zájem o sorbent, a proto jsme nuceni část produkce likvidovat, zde se cena pohybuje okolo -1500,- Kč/t. Naším zájmem je najít možnost nejlépe materiálového, i třeba jen částečného, využití, které by dávalo samozřejmě i ekonomický smysl.“* [36]

Z toho důvodu, je firma Praktik System s.r.o. ochotna dodávat polyuretanový odpad zdarma, popř. za odběr dokonce platit. To by mohlo být pro potenciálního výrobce velmi výhodné řešení.

Cena polymerních granulátů byla konzultována s Jakubem Hrdinou a Nikolou Vondráčkovou z firmy Resinex – distributor plastů a kaučuků. Ceny se však vzhledem k letošní ekonomické situaci vyšplhaly o desítky procent nahoru. Podle Jakuba Hrdiny: *„Navýšení cen je v řádech desetin eur a jsou oznámeny dopředu, tento rok je navýšení x-násobné a zavedeno během pár dní. Důvodem zdražení je hlavně energetická přírážka“*. Proto je tento cenový výpočet platný vzhledem k cenám v měsíci dubnu 2022. [37]

Ceny jednotlivých položek v €:

- PUR odpad – 0 €/kg.
- ABS – 3,3 €/kg.
- LDPE – 2,4 €/kg.
- HDPE – 2,1 €/kg.
- Maleinizovaný PE – 5 €/kg

Výpočet je vztažený na 1 kg materiálu jako celku. Při použití maleinizovaného systému je použito podobně jako v experimentu 5 hm.% (tj. 50 g). Cena polymeru je již přepočítána vzhledem k množství plniva tak, aby celkové množství všech komponent odpovídalo 1 kg.

Rozvaha pro ABS:

Tab. 12 Výpočet celkové úspory – ABS

Koncentrace plniva [%]	Cena ABS [€]	Cena plniva [€]	Celková úspora [€]
0	3,3	0	0
10	2,97	0	0,33
20	2,64	0	0,66
30	2,31	0	0,99
40	1,98	0	1,32
50	1,65	0	1,65

Rozvaha pro LDPE:

Tab. 13 Výpočet celkové úspory – LDPE

Koncentrace plniva [%]	Cena LDPE [€]	Cena plniva [€]	Celková úspora [€]
0	2,4	0	0
10	2,16	0	0,24
20	1,92	0	0,48
30	1,68	0	0,72
40	1,44	0	0,96
50	1,2	0	1,2

Rozvaha pro HDPE:

Tab. 14 Výpočet celkové úspory – HDPE

Koncentrace plniva [%]	Cena HDPE [€]	Cena plniva [€]	Celková úspora [€]
0	2,1	0	0
10	1,89	0	0,21
20	1,68	0	0,42
30	1,47	0	0,63
40	1,26	0	0,84
50	1,05	0	1,05

Rozvaha pro kombinaci LDPE a MAPE:*Tab. 15 Výpočet celkové úspory – m-LDPE*

Koncentrace plniva [%]	Cena LDPE [€]	Cena MAPE [€]	Cena plniva [€]	Celková úspora [€]
10	2,04	0,25	0	0,11
20	1,8	0,25	0	0,35
30	1,56	0,25	0	0,59
40	1,32	0,25	0	0,83
50	1,08	0,25	0	1,07

Rozvaha pro kombinaci HDPE a MAPE:*Tab. 16 Výpočet celkové úspory – m-HDPE*

Koncentrace plniva [%]	Cena HDPE [€]	Cena MAPE [€]	Cena plniva [€]	Celková úspora [€]
10	1,785	0,25	0	0,065
20	1,575	0,25	0	0,275
30	1,365	0,25	0	0,485
40	1,155	0,25	0	0,695
50	0,945	0,25	0	0,905

Ekonomický rozbor ukazuje, že využití polyuretanového odpadu má z finančního hlediska rozhodně význam – jedná se o položku, která nepřináší do výrobního procesu žádné náklady. Výrobní náklady se však můžou ještě snížit, pokud se ekonomická situace ve světě více stabilizuje. Pokud by k tomu došlo, ceny granulátu by mohly jít dolů, tím pádem by se zvýšila celková úspora. Pokud by se rozhodlo, že se má vyrábět z 1 tuny materiálu s 50% koncentrací plniva, úspora by např. u ABS činila 1650€ - čistě materiálové náklady. Při využití MAPE jsme stále z hlediska úspor v plusu.

Srovnání cen směsí s a bez použití MAPE:*Tab. 17 Ukázka % ztráty úspory při použití maleinizovaného systému – LDPE*

LDPE			
Koncentrace plniva	Směs bez MAPE [€]	Směs s MAPE [€]	Rozdíl
10	0,24	0,11	54 %
20	0,48	0,35	27 %
30	0,72	0,59	18 %
40	0,96	0,83	14 %
50	1,2	1,07	11 %

Tab. 18 Ukázka % ztráty úspory při použití maleinizovaného systému – HDPE

HDPE			
Koncentrace plniva	Směs bez MAPE [€]	Směs s MAPE [€]	Rozdíl
10	0,21	0,065	69 %
20	0,42	0,275	35 %
30	0,63	0,485	23 %
40	0,84	0,695	17 %
50	1,05	0,905	14 %

Tab. 17 a Tab. 18 ukazuje, o jak velkou část úspor přijdeme, pokud se rozhodneme u daných koncentrací využít MAPE. Zde už stojí za to popřemýšlet, jestli se např. u 10% koncentrace plniva u HDPE vyplatí ztratit 69 % hodnoty úspor na úkor menšího zlepšení mechanických vlastností – viz zkouška tahem.

9.2 Možnosti aplikace

Na základě zkušeností a získaných výsledků z praktické části diplomové práce jsou navrženy následující výrobky:

- LDPE – květináče na sazenice

Takový výrobek by mohl být vhodný pro použití PUR odpadu jako plniva, hlavně z důvodu, že květináče na sazenice obecně nemají vysoké nároky na mechanické vlastnosti. Stojí však ale za vyzkoušení, jak se bude takový výrobek chovat při uskladnění. Skladovací prostory v některých domácnostech (sklepech, přístřešcích) mohou být ve špatném stavu – změny teplot, vlhkost atd. Z tohoto důvodu by bylo vhodné provést zkoušku urychleného stárnutí na Veterometru, a zjistit, jestli by takový výrobek podléhal změnám při dlouhodobém uskladnění.

- HDPE – palety

Před samotnou výrobou by bylo nutno vytvořit vzorky a následně provést srovnávací zkoušky – např. na ohyb a tvrdost. Pokud by výsledné vlastnosti odpovídaly standardu takového výrobku, po finanční stránce by se taková výroba rozhodně vyplatila, jelikož většina HDPE palet je robustních a šlo by ušetřit značné množství materiálu.

- ABS – záslepka do zásuvek

Zásuvková záslepka je nenáročná z hlediska mechanických vlastností. U tohoto výrobku by se nemusely provádět další testy, protože ABS je sám o sobě odolný proti mechanickému poškození a PUR plnivo by se přidalo z důvodu zlevnění výroby.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá možností využití polyuretanového odpadu jako plniva v polymerní matrici. Teoretická část má seznámit čtenáře co nejlépe s řešenou problematikou v části praktické. První kapitola pojednává o kompozitních materiálech, druhá o polyolefinech společně se styrenovými polymery a třetí kapitola podrobně rozebírá problematiku polyuretanu a zpracování jeho odpadů. Čtvrtá část krátce popisuje zpracování polymerních směsí a poslední kapitola vysvětluje metodiku hodnocení vybraných vlastností.

V experimentální části byly nejprve zvoleny polymerní matrice a vhodné koncentrace plnění. Materiály byly vybrány z hlediska polarity – LDPE, HDPE (nepolární) a ABS, MAPE a PUR odpad (polární). Plnění probíhalo až do 50 hm.%. Směsi byly nejprve homogenizovány hnětením a vzorky se vyrobily lisováním. Pro vyhodnocování vybraných vlastností byla zvolena zkouška tahem, analýza FTIR a měření přenosového útlumu. Součástí práce je také ekonomická rozvaha a možnosti aplikace námi vyrobených kompozitů.

Výsledky zkoušky tahem jednotlivých směsí ukazují, že se zvyšující se koncentrací plniva se mez pevnosti R_m snižuje. Oproti čistému polymeru je však u všech směsí pokles tohoto parametru už při 10% plnění více než 30 %. Takto vysoký pokles byl nečekaným zjištěním, a je potřeba na tento fakt při aplikaci u reálných výrobků dbát zvýšenou opatrností. U modulu E nebyl jednoznačný trend pro všechny směsi, lze však konstatovat, že čistý polymer měl nejnižší modul E (výjimka pouze u m-HDPE) a nejvyšší hodnoty se pohybovaly u 40-50% koncentrace plniva. Přidání maleinizovaného systému (zvýšení polarity u nepolárních polymerů) mělo pozitivní účinek pro mez pevnosti v tahu R_m . U modulu E není zlepšení ani zhoršení prokazatelné.

Teplotní zatížení vzorků (60 °C/24 h) nemělo vliv na chemické změny ani jedné ze směsí – potvrzeno na záznamech FTIR. Zároveň se díky opětovné zkoušce tahem vyvrátila teorie, že by během teplotního zatížení došlo k odstranění vnitřního pnutí, což by mohlo vést ke zlepšení mechanických vlastností. U m-HDPE došlo vlivem teplotního zatížení ke zvýšení hodnot modulu E u všech koncentrací plniva (kromě čistého). Tento krok se však hlavně z ekonomického hlediska pro praxi a budoucí výrobky rozhodně nevyplácí.

Měření přenosového útlumu u námi zvolených směsí potvrdilo, že se zvyšující se tuhostí vzorků, se zvyšuje rezonanční frekvence – obecně tento fakt platí např. pro gumárenský

průmysl. To je značným přínosem, jelikož by šlo tuto metodu využít jako srovnávací nedestruktivní zkoušku pro určení, jaký materiál má vyšší modul pružnosti v tahu E .

Polyuretanový odpad firmy Praktik System s.r.o. by bylo možné odebírat zdarma, což je z hlediska ekonomické rozvahy zcela zásadní informace. Cenový výpočet je dost ovlivněn současnou ekonomickou situací, v kombinaci s energetickou přírážkou. Tím pádem je finanční rozbor relevantní vzhledem k cenám materiálů v první třetině roku 2022 – může dojít ke zpětnému snížení cen.

Na základě provedených měření a získaných dat je nutno poukázat na fakt, že polyuretanový odpad jako plnivo slouží spíše ke zlevnění výroby, nikoliv jako plnivo, které by významně zlepšovalo vlastnosti. Dále byly zvoleny výrobky, u kterých by se dal polyuretanový odpad využít. U LDPE se jedná o květináče na sazenice, palety u HDPE a pro ABS byly vybrány záslepky do zásuvek. U aplikací LDPE a HDPE by bylo nutno provést další zkoumání, a to hlavně kvůli požadovaným vlastnostem, které nejsou ověřené v rámci diplomové práce. Možností aplikací je určitě více, avšak v rámci této práce je zmíněn pouze jeden výrobek pro každý materiál.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. CLYNE, T. W. a D. HULL, 2019. *An Introduction to Composite Materials* [online]. 345 [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: doi:10.1017/9781139050586
2. CHAWLA, Krishan Kumar, [2012]. *Composite materials: science and engineering*. Third edition. New York: Springer Science+Business Media, xxiii, 542 s. ISBN 9780387743646.
3. DAĐOUREK, Karel, 2007. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7372-279-1.
4. EHRENSTEIN, Gottfried W., 2009. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-29-6.
5. MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA, 2008. *Nauka o materiálu*. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN 978-80-01-03927-4.
6. SOLAŘÍK, Tomáš, 2020. *Adaptivní frézování kompozitů se skleněnou výztuží*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 92 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/48757>. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Bílek, Ondřej. (Obr. 4)
7. KOZLOV, Georgij Vladimirovič, Abdulach Kasbulatovič MIKITAJEV a Gennadij Jefremovič ZAIKOV, ed., c2011. *Polymer and composites: theory and practical applications*. New York: Nova Science Publishers, 1 online zdroj (vii, 205 s.). Polymer science and technology. ISBN 9781617610370.
8. THOMAS, Sabu, ed., c2012-2014. *Polymer composites*. Weinheim: Wiley-VCH, 3 sv. ISBN 9783527329854.
9. KOO, Joseph H., 2019. *Polymer nanocomposites: Processing, characterization, and applications*. 2nd edition. New York: McGraw-Hill. ISBN 978-1-260-13231-1.
10. SEN, Mousumi, 2020. Nanocomposite Materials. *Nanotechnology and the Environment*. IntechOpen. ISBN 978-1-78985-228-8. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.93047

11. DUCHÁČEK, Vratislav, 2011. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. ISBN 978-80-7080-788-0.
12. CHVÁTALOVÁ, Lenka, Jana VÝCHOPŇOVÁ, Roman ČERMÁK a Miroslav RAAB. *Netradiční polyolefiny: Struktura, vlastnosti a perspektivy. Plasty a kaučuk*. 2007, vol. 44, iss. 7-8, s. 202-208. ISSN 0322-7340
13. MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK, 2000. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 537 s. ISBN 8085920727.
14. KHANAM, P. Noorunnisa a Mariam Al Ali ALMAADEED, 2015. *Processing and characterization of polyethylene-based composites*. **1**(2), 63-79. ISSN 2055-0340. Dostupné z: doi:10.1179/2055035915Y.0000000002
15. THOMAS, Sabu et al., ed., [2017]. *Polyurethane polymers: composites and nanocomposites*. Amsterdam: Elsevier, xlii, 591 s. ISBN 9780128040652.
16. KRÓL, Piotr a Bożena KRÓL, 2020. Structures, properties and applications of the polyurethane ionomers. *Journal of Materials Science*. **55**(1), 73-87. ISSN 0022-2461. Dostupné z: doi:10.1007/s10853-019-03958-y
17. CAVACO, Luís Inácio a Joana Almeida MELO, ed., c2012. *Polyurethane: properties, structure and applications*. New York: Nova Science Publishers, xi, 162 s. Polymer science and technology. ISBN 9781619424531.
18. AKINDOYO, John O. et al., 2016. Polyurethane types, synthesis and applications – a review. *RSC Advances*. **6**(115), 114453-114482. ISSN 2046-2069. Dostupné z: doi:10.1039/C6RA14525F
19. GAMA, Nuno, Artur FERREIRA a Ana BARROS-TIMMONS, 2018. Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. *Materials*. **11**(10). ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma11101841
20. ZAFAR, Fahmina, SHARMIN, Eram, ed., 2012. *Polyurethane*. IntechOpen, 447. Dostupné z: doi:10.5772/2416
21. DATTA, Janusz a Marcin WŁOCH, 2017. Recycling of Polyurethanes. *Polyurethane Polymers*. Elsevier, 323-358. ISBN 9780128040393. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-804039-3.00014-2

22. ZIA, Khalid Mahmood, Haq Nawaz BHATTI a Ijaz AHMAD BHATTI, 2007. Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: A review. *Reactive and Functional Polymers*. **67**(8), 675-692. ISSN 13815148. Dostupné z: doi:10.1016/j.reactfunctpolym.2007.05.004
23. GRANGER, James; KUMOR, Dennis; NADELLA, Hari. *Process and apparatus for preparation of thermoplastic polymer blends*. U.S. Patent Application No 11/404,707, 2007.
24. PONZIELLI, Guiseppe. *Mixing and kneading device for polymer compositions*. U.S. Patent Application No 10/487,343, 2005.
25. NOVOTNÝ, Lukáš a Petr LENFELD, 2012. *Příprava polymerní směsi pro zvláknování*. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné také z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/12618>
26. ČSN EN ISO 527. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. Termíny, definice a průběh tahové zkoušky u polymerních materiálů*. Český normalizační institut, 2012.
27. HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK, 2001. *Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 1. díl, Polotovary a jejich technologičnost*, 316 s.. ISBN 8071832448.
28. *Plastics Technology. Stress-Strain Behavior of Polymers* [online]. [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Stress-Strain%20Behavior.html>
29. BRADLEY, M., 2013. Thermo Fisher Scientific. *Introduction to FTIR* [online]. [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/BR50555_E_0513M_H_1.pdf
30. BRADLEY, M., 2013. Thermo Fisher Scientific. *FTIR Applications* [online]. [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/cz/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-applications.html>

31. Wikipedia: the free encyclopedia, 2011. *FTIR Interferometer* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: https://cs.m.wikibooks.org/wiki/Soubor:FTIR_Interferometer.png (*Obr. 17*)
32. VAŠINA, Martin, Lumír HRUŽÍK a Adam BUREČEK, 2016. Structural Damping of Mechanical Vibration. *Manufacturing Technology*. **16**(6), 1379-1382. ISSN 12132489. Dostupné z: doi:10.21062/ujep/x.2016/a/1213-2489/MT/16/6/1379
33. *Přístrojové vybavení - Fakulta technologická* [online]. [cit. 2022-03-23]. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-inzenyrstvi-polymeru/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/>
34. *Měřicí, kontrolní a testovací stroje, měřidla, optické přístroje, snímače, měřící ústředny - Fakulta technologická* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-vyrobniho-inzenyrstvi/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/merici-kontrolni-a-testovaci-stroje/>
35. PÖSCHL, Marek, 2021. *Vliv složení kaučukových směsí na bariérové vlastnosti vulkanizátů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 1 online zdroj (55 stran). ISBN 978-80-7454-995-3. Dostupné také z: <https://digilib.k.utb.cz/handle/10563/46007>
36. *Kontakt - Praktik System* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.praktiksystem.cz/kontakt/>
37. *Kontakty - Resinex* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/kontakty.html>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Al	Hliník
HDPE	Vysokohustotní polyethylen
PVC	Polyvinylchlorid
PMMA	Polymethylmethakrylát
LDPE	Nízkohustotní polyethylen
PE	Polyethylen
PET	Polyethylentereftalát
PBT	Polybutylentereftalát
PEEK	Polyetherketon
PP	Polypropylen
ABS	Akrylonitrilbutadienstyren
RTG	Rentgenové záření
UV	Ultrafialové záření
NTDA	Dianhydrid naftalenetetrakarboxylové kyseliny
ULDPE	Ultra-Low Density
LLDPE	Linear Low Density
MDPE	Medium Density
HMW-HDPE	High Molecular Weight HDPE
UHMW-HDPE	Ultra-High Molecular Weight HDPE
HZ	Hookeův zákon
PUR	Polyurethan
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Porovnání mezi konvenčními monolitickými materiály a kompozitními materiály [2]</i>	13
<i>Obr. 2 Synergický efekt v kompozitním materiálu [3]</i>	14
<i>Obr. 3 Různé konfigurace molekulárního řetězce: a) lineární, b) rozvětvený, c) zesíťovaný, d) žebříkový [2]</i>	15
<i>Obr. 4 Uspořádání vláknové výztuže: a) jednosměrné, b) tkanina, c) rohož, d) víceosá, e) krátká vlákna jednosměrně orientována, f) krátká vlákna nahodile orientována [6]</i>	16
<i>Obr. 5 Částicový kompozit s plastovou matricí. Ekviaxiální částice kaolinu v polyetylenové matrici [3]</i>	18
<i>Obr. 6 Rozdělení nanokompozitů podle polymerní/nepolymerní báze [10]</i>	20
<i>Obr. 7 Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich chování za běžné a zvýšené teploty [11]</i>	21
<i>Obr. 8 Porovnání indexu růstu světové spotřeby některých materiálů v letech 1970-2010 [11]</i>	22
<i>Obr. 9 Strukturní vzorec PE [13]</i>	23
<i>Obr. 10 Struktura makromolekul LDPE [14]</i>	24
<i>Obr. 11 Struktura makromolekul HDPE [14]</i>	25
<i>Obr. 12 Příprava základních skupin styrenových plastů [13]</i>	26
<i>Obr. 13 Celosvětová spotřeba PUR pro rok 2016 [19]</i>	30
<i>Obr. 14 Proces opětovného spojení PUR odpadu [21]</i>	33
<i>Obr. 15 Příklad procesu přeměny PUR odpadu na prášek [21]</i>	33
<i>Obr. 16 Průběh tahové zkoušky pro různé typy polymerů [28]</i>	37
<i>Obr. 17 Schéma FTIR zařízení [31]</i>	39
<i>Obr. 18 Laboratorní hnětič Brabender [33]</i>	46
<i>Obr. 19 Ruční lisy [33]</i>	47
<i>Obr. 20 Vulkanizační lis (v tomto případě pouze pro chlazení) [33]</i>	47
<i>Obr. 21 Vysekávací stroj ZPS 06102 P1 [33]</i>	48
<i>Obr. 22 Zkušební stroj Zwick/Roell 1456 [34]</i>	49
<i>Obr. 23 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – ABS</i>	50
<i>Obr. 24 Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – ABS</i>	51
<i>Obr. 25 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – LDPE</i>	51
<i>Obr. 26 Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – LDPE</i>	52
<i>Obr. 27 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – HDPE</i>	52
<i>Obr. 28 Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – HDPE</i>	53
<i>Obr. 29 Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – m-HDPE</i>	53

<i>Obr. 30</i>	<i>Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – m-HDPE</i>	54
<i>Obr. 31</i>	<i>Vliv koncentrace plniva na mez pevnosti v tahu – m-LDPE</i>	54
<i>Obr. 32</i>	<i>Vliv koncentrace plniva na modul pružnosti v tahu – m-LDPE</i>	55
<i>Obr. 33</i>	<i>Vliv maleinizace na mez pevnosti v tahu – HDPE</i>	55
<i>Obr. 34</i>	<i>Vliv maleinizace na modul pružnosti v tahu – HDPE</i>	56
<i>Obr. 35</i>	<i>Vliv maleinizace na mez pevnosti v tahu – LDPE</i>	56
<i>Obr. 36</i>	<i>Vliv maleinizace na modul pružnosti v tahu – LDPE</i>	57
<i>Obr. 37</i>	<i>Zařízení FT-IR ATR Nicolet</i>	58
<i>Obr. 38</i>	<i>FTIR záznam – čisté ABS</i>	59
<i>Obr. 39</i>	<i>FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – ABS</i>	59
<i>Obr. 40</i>	<i>FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – ABS</i>	60
<i>Obr. 41</i>	<i>FTIR záznam – čisté LDPE</i>	60
<i>Obr. 42</i>	<i>FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – LDPE</i>	61
<i>Obr. 43</i>	<i>FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – LDPE</i>	61
<i>Obr. 44</i>	<i>FTIR záznam – čisté HDPE</i>	62
<i>Obr. 45</i>	<i>FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – HDPE</i>	62
<i>Obr. 46</i>	<i>FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – HDPE</i>	63
<i>Obr. 47</i>	<i>FTIR záznam – čisté LDPE</i>	63
<i>Obr. 48</i>	<i>FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – m-LDPE</i>	64
<i>Obr. 49</i>	<i>FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – m-LDPE</i>	64
<i>Obr. 50</i>	<i>FTIR záznam – čisté HDPE</i>	65
<i>Obr. 51</i>	<i>FTIR záznam pro 10% koncentraci plniva – m-HDPE</i>	65
<i>Obr. 52</i>	<i>FTIR záznam pro 50% koncentraci plniva – m-HDPE</i>	66
<i>Obr. 53</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – ABS</i>	66
<i>Obr. 54</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti v tahu – ABS</i>	67
<i>Obr. 55</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – LDPE</i>	67
<i>Obr. 56</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti v tahu – LDPE</i>	68
<i>Obr. 57</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – HDPE</i>	68
<i>Obr. 58</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti v tahu – HDPE</i>	69
<i>Obr. 59</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – m-LDPE</i>	69
<i>Obr. 60</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti v tahu – m-LDPE</i>	70
<i>Obr. 61</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na mez pevnosti v tahu – m-HDPE</i>	70
<i>Obr. 62</i>	<i>Vliv teplotního zatížení na modul pružnosti – m-HDPE</i>	71
<i>Obr. 63</i>	<i>Schéma zapojení zařízení pro měření přenosového útlumu [32]</i>	73
<i>Obr. 64</i>	<i>Závislost přenosového útlumu na frekvenci – ABS</i>	74

<i>Obr. 65 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – LDPE</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 66 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – HDPE.....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 67 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – m-LDPE</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 68 Závislost přenosového útlumu na frekvenci – m-HDPE</i>	<i>77</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Porovnání mechanických parametrů vybraných druhů vláken s parametry stejného, ale kompaktního materiálu [5].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2 Typické vlastnosti LDPE [13].....</i>	<i>24</i>
<i>Tab. 3 Typické vlastnosti HDPE [13]</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 4 Množství jednotlivých složek pro základní směsi</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5 Množství jednotlivých složek pro maleinizované směsi</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 6 Technická specifikace zkušebního stroje Zwick/Roell 1456 [34]</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 7 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E</i>	<i>74</i>
<i>Tab. 8 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 9 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 10 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 11 Vybrané koncentrace a její hodnoty rez. frekvence společně s modulem E</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 12 Výpočet celkové úspory – ABS.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 13 Výpočet celkové úspory – LDPE</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 14 Výpočet celkové úspory – HDPE.....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 15 Výpočet celkové úspory – m-LDPE</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 16 Výpočet celkové úspory – m-HDPE.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 17 Ukázka % ztráty úspory při použití maleinizovaného systému – LDPE.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 18 Ukázka % ztráty úspory při použití maleinizovaného systému – HDPE.....</i>	<i>81</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list LDPE DOW 150 E

Příloha P II: Materiálový list HDPE Exxonmobil HTA 002

Příloha P III: Materiálový list ABS Trinseo MAGNUM 3325 MT

Příloha P IV: Materiálový list MAPE Priex 15005

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST LDPE DOW 150 E

Technical Information



DOW™ LDPE 150E Low Density Polyethylene Resin

Overview

DOW LDPE™ 150E Low Density Polyethylene Resin can be readily extruded using conventional blown film techniques utilising melt temperatures between 170 and 230°C. DOW LDPE 150E Low Density Polyethylene Resin, when properly fabricated, shows a good combination of processability, stiffness and physical properties.

Note: DOW LDPE 150E Low Density Polyethylene Resin should comply with:

- EU, No 10/2011
- U.S. FDA 21 CFR 177.1520(c)2.2
- U.S. FDA-DMF
- Consult the regulations for complete details

Applications:

- Heavy duty industrial film

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.921 g/cm ³	0.921 g/cm ³	ASTM D792
Melt Index (190°C/2.16 kg)	0.25 g/10 min	0.25 g/10 min	ISO 1133
Films	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Film Thickness - Tested	4 mil	100 µm	
Tensile Modulus			ISO 527-3
2% Secant, MD : 3.9 mil (100 µm)	18600 psi	128 MPa	
2% Secant, TD : 3.9 mil (100 µm)	18600 psi	128 MPa	
Tensile Stress			ISO 527-3
MD : Yield, 3.9 mil (100 µm)	1330 psi	9.20 MPa	
TD : Yield, 3.9 mil (100 µm)	1100 psi	7.60 MPa	
MD : Break, 3.9 mil (100 µm)	3050 psi	21.0 MPa	
TD : Break, 3.9 mil (100 µm)	2970 psi	20.5 MPa	
Tensile Elongation			ASTM D882
MD : Break, 3.9 mil (100 µm)	470 %	470 %	
TD : Break, 3.9 mil (100 µm)	530 %	530 %	
Dart Drop Impact (3.9 mil (100 µm))	430 g	430 g	ISO 7765-1/A
Elmendorf Tear Strength			ASTM D1922
MD : 3.9 mil (100 µm)	270 g	270 g	
TD : 3.9 mil (100 µm)	480 g	480 g	
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Vicat Softening Temperature	205 °F	96.0 °C	ASTM D1525

Extrusion Notes

Blow-up ratio 1:2.5

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST HDPE EXXONMOBIL HTA 002

Product Datasheet



ExxonMobil™ HDPE HTA 002HD5 High Density Polyethylene Resin

Product Description

HTA 002HD5 is a general purpose medium molecular weight HDPE grade, characterized by easy processability, especially in coextrusion and blending with other polyolefins. HTA 002HD5 can also be used pure, especially for easy processing and conversion into small and thin bags, to be used for light item packaging.

General

Availability ¹	• Africa & Middle East	• Asia Pacific	• Europe
Additive	• Antiblock: No	• Slip: No	• Thermal Stabilizer: Yes
Applications	• Blown Film • Collation Shrink • Food Packaging • General Packaging • Grocery Sacks	• Heavy Duty Bags • Industrial Packaging • Label Film • Shrink Film • Stand Up Pouches	• Thin Gauged Consumer Bags • Trash Bags • Trash Can Liners
Revision Date	• 09/15/2016		

Resin Properties	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Density	0.952 g/cm ³	0.952 g/cm ³	ASTM D1505
High Load Melt Index (190°C/21.6 kg)	16 g/10 min	16 g/10 min	ASTM D1238
Melt Mass-Flow Rate (MFR) (190°C/5.0 kg)	0.68 g/10 min	0.68 g/10 min	ASTM D1238

Thermal	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Vicat Softening Temperature	259 °F	126 °C	ASTM D1525

Film Properties	Typical Value (English)	Typical Value (SI)	Test Based On
Tensile Strength at Yield MD	4200 psi	29 MPa	ASTM D882
Tensile Strength at Yield TD	4200 psi	29 MPa	ASTM D882
Tensile Strength at Break MD	8000 psi	60 MPa	ASTM D882
Tensile Strength at Break TD	7300 psi	50 MPa	ASTM D882
Elongation at Break MD	320 %	320 %	ASTM D882
Elongation at Break TD	450 %	450 %	ASTM D882
Secant Modulus MD - 1% Secant	140000 psi	960 MPa	ASTM D882
Secant Modulus TD - 1% Secant	170000 psi	1200 MPa	ASTM D882
Dart Drop Impact	160 g	160 g	ASTM D1709A
Elmendorf Tear Strength MD	8 g	8 g	ASTM D1922
Elmendorf Tear Strength TD	60 g	60 g	ASTM D1922

Legal Statement

Contact your ExxonMobil Chemical Customer Service Representative for potential food contact application compliance (e.g. FDA, EU, HPFB).

This product is not intended for use in medical applications and should not be used in any such applications.

Processing Statement

The film properties have been measured on 15 µm (0.59 mil) thick films with a blow-up ratio of 4 : 1 and a frostline height of 9 x die diameter (die diameter/ gap: 120mm/1.0mm (4.7 in/0.06 in); 215°C (419°F) melt temperature; 70 kg/hr (154 lb/hr) output).

Notes

Typical properties: these are not to be construed as specifications.

¹ Product may not be available in one or more countries in the Identified Availability regions. Please contact your Sales Representative for complete Country Availability.

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST ABS TRINSEO MAGNUM 3325 MT

Technical Information



MAGNUM™ 3325 MT ABS Resin

Overview

Overview:

MAGNUM 3325MT is a medium heat ABS. Its inherent low gloss combined with a high flow makes it specifically suitable for unpainted interior automotive applications. MAGNUM 3325MT can thereby help you to save up to 50% of the part costs. It is globally available, locally produced in major car production regions.

Benefits:

- Lot to lot consistency allowing for optimal machine parameters settings from the start
- Self-coloring enabling improvement of costs by using less pigments and lowering your logistic costs
- Low VOC allowing a better interior air quality facing increasing regulatory and OEMs constraints.
- Heat stability during wide range of processing temperatures: enhanced part design freedom
- High scratch and mar resistance for an improved aesthetic durability of the parts
- Easier recyclability of unpainted part

Applications:

- Matt/unpainted interior automotive applications
- Mid-consoles
- Pillars
- Door liners
- Glove boxes

Automotive Specifications

- CHRYSLER MS-DB-191 Type A CPN1497 Color: Black
- FORD ESB-M4D483-A2
- FORD WSS-M4D483-C1
- GM GMP.ABS.003
- CHRYSLER MS-DB-191 Type A CPN1734 Color: Color Match
- FORD WSK-M4D827-A
- FORD WSS-M4D827-C1
- GM GMW15572P-ABS-T2 Color: Natural

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density			
--	1.04 g/cm ³	1.04 g/cm ³	ASTM D792
--	1.05 g/cm ³	1.05 g/cm ³	ISO 1183/B
Apparent Density	0.65 g/cm ³	0.65 g/cm ³	ISO 60
Melt Mass-Flow Rate (MFR)			
230°C/3.8 kg	2.5 g/10 min	2.5 g/10 min	ASTM D1238
220°C/10.0 kg	10 g/10 min	10 g/10 min	ISO 1133
Melt Volume-Flow Rate (MVR) (220°C/10.0 kg)	0.671 in ³ /10min	11.0 cm ³ /10min	ISO 1133
Molding Shrinkage			
Flow	4.0E-3 to 7.0E-3 in/in	0.40 to 0.70 %	
--	4.0E-3 to 7.0E-3 in/in	0.40 to 0.70 %	ISO 294-4
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Modulus			
-- ¹	300000 psi	2070 MPa	ASTM D638
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	319000 psi	2200 MPa	ISO 527-2
Tensile Strength			
Yield ¹	6130 psi	42.3 MPa	ASTM D638
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	6240 psi	43.0 MPa	ISO 527-2/50
Tensile Strain			
Yield, 0.126 in (3.20 mm), Injection Molded	3.3 %	3.3 %	ISO 527-2/50
Break ¹	25 %	25 %	ASTM D638

Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Flexural Modulus			
... ²	320000 psi	2210 MPa	ASTM D790
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded ^{3,4}	305000 psi	2100 MPa	ISO 178
Flexural Strength			
... ²	9350 psi	64.5 MPa	ASTM D790
0.126 in (3.20 mm), Injection Molded ^{3,4}	9430 psi	65.0 MPa	ISO 178
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Charpy Notched Impact Strength			
-22°F (-30°C), Compression Molded	3.8 ft-lb/in ²	8.0 kJ/m ²	ISO 179/2
-22°F (-30°C), Injection Molded	5.2 ft-lb/in ²	11 kJ/m ²	ISO 179/1eA
73°F (23°C), Injection Molded	8.1 ft-lb/in ²	17 kJ/m ²	ISO 179/1eA
73°F (23°C), Compression Molded	5.7 ft-lb/in ²	12 kJ/m ²	ISO 179/2
Notched Izod Impact			
73°F (23°C), 0.126 in (3.20 mm) ⁵	5.8 ft-lb/in	310 J/m	ASTM D256
-22°F (-30°C)	4.8 ft-lb/in ²	10 kJ/m ²	ISO 180/1A
73°F (23°C)	8.1 ft-lb/in ²	17 kJ/m ²	ISO 180/1A
Instrumented Dart Impact ⁶			ASTM D3763
-20°F (-29°C), 0.126 in (3.20 mm), Peak Energy	281 in-lb	31.7 J	
-20°F (-29°C), 0.126 in (3.20 mm), Total Energy	304 in-lb	34.3 J	
73°F (23°C), 0.126 in (3.20 mm), Peak Energy	275 in-lb	31.1 J	
73°F (23°C), 0.126 in (3.20 mm), Total Energy	402 in-lb	45.4 J	
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Deflection Temperature Under Load			
66 psi (0.45 MPa), Unannealed, 0.126 in (3.20 mm)	205 °F	96.1 °C	ASTM D648
264 psi (1.8 MPa), Unannealed, 0.126 in (3.20 mm)	181 °F	82.8 °C	ASTM D648
264 psi (1.8 MPa), Annealed	214 °F	101 °C	ISO 75-2/A
Vicat Softening Temperature			
--	227 °F	108 °C	ASTM D1525
--	216 °F	102 °C	ISO 306/B50
CLTE - Flow	5.2E-5 in/in/°F	9.4E-5 cm/cm/°C	ASTM D696
Flammability	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Burning Rate ⁷ (0.0787 in (2.00 mm))	2.4 in/min	60 mm/min	ISO 3795
Flame Rating ⁷			UL 94
0.06 in (1.5 mm)	HB	HB	
0.12 in (3.0 mm)	HB	HB	
Carbon Emission ⁷	20.0 µg/g	20.0 µg/g	VDA 277
Fogging ⁷ (212°F (100°C))	98 %	98 %	ISO 6452

Notes

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

¹ Type I, 2.0 in/min (51 mm/min)

² Type I, 0.20 in/min (5.1 mm/min)

³ 0.079 in/min (2.0 mm/min)

⁴ 3-points

⁵ 10 mil (0.25 mm) Notch Depth

⁶ 11.1 ft/sec (3.39 m/sec)

⁷ This rating not intended to reflect hazards presented by this or any other material under actual fire conditions.

PŘÍLOHA P IV: MATERIÁLOVÝ LIST MAPE PRIEX 15005

SONGHAN

Plastic Technology Co., Ltd.

www.lookpolymers.com email : sales@lookpolymers.com

Addcomp PRIEX® 15005 Maleic Anhydride modified LDPE

Category : Polymer , Thermoplastic , Polyethylene (PE) , Anhydride-Modified Polyethylene , LDPE

Material Notes:

Functionalised low density polyethylene to be used as compatibiliser for polymer blends or coupling agent for wood flour, natural fibres, or mineral filled polyolefins. Also suitable to reduce pigment-related warpage effects in polyolefins. Examples: Cable compounds, organic monopigment preparations and wood flour filled polymer composites (WPC's). Mode of action and advantages: PRIEX® 15005 is a polyethylene, grafted with an extra high content of maleic anhydride. The grafted maleic anhydride introduces polarity to the polymer achieving compatibility between polyolefins and more polar polymers like EVOH. Advantages: Excellent mechanical properties, good cost / performance; Ultra low smell, low VOC and emissions; Excellent coupling agent for natural fiber reinforced polymer composites or wood flour reinforced polymer composites; Free flowing pellets; and Safe and easy handling. Food contact: PRIEX® 15005 composition meets the requirements of Commission Directive 2002/72/EC and further amendments. Information provided by ADDCOMP

Order this product through the following link:

http://www.lookpolymers.com/polymer_Addcomp-PRIEX-15005-Maleic-Anhydride-modified-LDPE.php

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	0.920 g/cc	0.0332 lb/in ³	ISO 1183-3
Oxidative Induction Time (OIT)	>= 20 min @Temperature 210 °C	>= 20 min @Temperature 410 °F	ISO 11357-6
Melt Flow	4.5 - 6.0 g/10 min @Load 2.16 kg, Temperature 190 °C	4.5 - 6.0 g/10 min @Load 4.76 lb, Temperature 374 °F	die 8/2; ISO 1133

Thermal Properties	Metric	English	Comments
Melting Point	106 °C	223 °F	ISO 11357-3

Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	<= 240 °C	<= 464 °F	

Descriptive Properties	Value	Comments
Appearance	White or slightly yellow granules	
Free Maleic Anhydride	<100 mg/kg	Slovay method
Grafted Maleic Anhydride	0.4-0.5%	Slovay method

Contact Songhan Plastic Technology Co.,Ltd.

Website : www.lookpolymers.com