

Možnosti recyklace odpadu z tetrapaku, PP a PE

Bc. Jan Švec

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Švec**
Osobní číslo: **T19491**
Studijní program: **N0722A130001 Inženýrství polymerů**
Studijní obor: **Inženýrství polymerů**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Možnosti recyklace odpadu z tetrapaku, PP a PE**

Zásady pro vypracování

Zpracujte literární rešerši na dané téma a na jejím základě prověřte možnosti zpracování odpadního tetrapaku, PE a PP odpadu z obalových materiálů a jejich kombinace, prověřte volbu a nastavení technologie pro přepracování a porovnejte základní vlastnosti originálního a přepracovaného materiálu.

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

Seznam doporučené literatury:

Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works, Polymer Degradation and Stability Volume 98, Issue 12, December 2013, Pages 2801-2812 Handbook of Recycling 1st Edition, **Editors:** Ernst Worrell Markus Reuter **Hardcover ISBN:** 9780123964595 Recycling of Polymers: A Review, <https://doi.org/10.1002/cssc.201300898>

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

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2021**

L.S.

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan

Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2021

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 užit 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, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

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 nahrání do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne: 14. 5. 2021

Jméno a příjmení studenta: Jan Švec

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá využitím plastových odpadů, zejména polyethylenových obalů a odpadního polypropylenu z automobilového průmyslu s předpřipraveným odpadním tetrapakem. Dále byl využit polyethylen Dowlex a plazmově upravený polyethylen Dowlex a bylo zkoumáno, zda plazmová úprava výrazně modifikuje vlastnosti daného polyethylenů. U všech vyjmenovaných materiálů bylo zkoumáno, zda předpřipravený odpadní tetrapak ovlivňuje vlastnosti materiálů a zda by materiál plněný odpadním tetrapakem byl vhodný jako obalový materiál nebo jako materiál pro designové či konstrukční účely. Teoretická část popisuje recyklaci a zpracování odpadních polymerních materiálů, rozvlákňování a zpracování odpadního tetrapaku a metody, které byly použity pro hodnocení vlastností vzniklých směsí obsahující odpadní tetrapak. Praktická část popisuje přípravu odpadního tetrapaku a přípravu vzorků, které byly pro míchání s odpadním tetrapakem vybrány. Dále se v praktické části nachází hodnocení vlastností, které byly dosaženy danou modifikací.

Klíčová slova: tetrapak, polypropylen, polyethylen

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the use of plastic waste, especially polyethylene packaging and waste polypropylene from the automotive industry with pre-prepared waste tetrapack. Furthermore, Dowlex polyethylene and Dowlex plasma treated polyethylene were used and it was investigated whether the plasma treatment significantly modifies the properties of the polyethylene. For all listed materials, it was investigated whether the pre-prepared waste tetrapack affects the properties of the materials and whether the material filled with waste tetrapack would be suitable as a packaging material or as a material for design or construction purposes. The theoretical part describes the recycling and processing of waste polymer materials and waste tetrapack and methods that were used to evaluate the properties of the resulting mixtures containing waste tetrapack. The practical part describes the preparation of waste tetrapack and the preparation of samples that were selected for mixing with waste tetrapack. Furthermore, in the practical part there is an evaluation of the properties that were achieved by the modification.

Keywords: tetrapack, polypropylene, polyethylene

Tímto způsobem chci poděkovat své vedoucí práce doc. Ing. Dagmar Měřínské, Ph.D., za zaopatření potřebných materiálů, za odborné vedení a poskytnutí rad při zpracovávání diplomové práce.

Poděkování patří firmě SUEZ a.s. za dodání připraveného odpadního polyethylenu a firmě Surfacetreat a.s. za dodání čistého a plazmově modifikovaného polyethylenu Dowlex od společnosti Dow Chemical Company.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Plastikářský klastr z. s. (Plastr) se sídlem ve Zlíně za možnost přípravy odpadního tetrapaku.

Obrovské poděkování patří rodině a přítelkyni, kteří i v této nelehké době pandemie mě podporovali ve studiu.

Motto:

„Budovy – to jsou hromady cihel a betonu. Stroje – to je spousta železa a oceli. Život tomu dávají teprve lidé.“

Tomáš Baťa

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZÁKLADNÍ ÚPRAVY ODPADU	11
1.1 POUŽITÉ METODY.....	13
1.2 ZPRACOVÁNÍ PLASTOVÉHO ODPADU.....	16
1.3 METODY RECYKLACE ODPADNÍHO TETRAPAKU.....	21
2 MATERIÁLY	26
2.1 TETRAPAK.....	26
2.2 POLYOLEFINY.....	28
2.2.1 Polyethylen (PE).....	28
2.2.2 Polypropylen (PP).....	33
3 METODY HODNOCENÍ	35
3.1 MÍCHÁNÍ POMOCÍ VYTLAČOVACÍHO STROJE.....	35
3.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	39
3.3 REOLOGIE.....	42
3.4 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ (FTIR).....	48
3.5 MIKROSKOPIE.....	50
3.6 DYNAMICKÁ MECHANICKÁ ANALÝZA (DMA).....	51
3.7 PROPUSTNOST PRO PLYNY.....	53
II PRAKTICKÁ ČÁST	56
4 CÍL PRÁCE	57
5 PŘÍPRAVA TETRAPAKU	58
6 PŘÍPRAVA VZORKŮ	60
6.1 PŘÍPRAVA ODPADNÍHO POLYETHYLENU.....	60
6.2 PŘÍPRAVA PLAZMOVĚ UPRAVENÉHO POLYETHYLENU DOWLEX 2631.10UE.....	61
6.3 PŘÍPRAVA SMĚSÍ.....	63
7 VLIV MODIFIKACE NA VLASTNOSTI	68
7.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	68
7.1.1 Odpadní polyethylen.....	68
7.1.2 Polyethylen Dowlex 2631.10UE.....	69
7.1.3 Plazmově upravený polyethylen Dowlex 2631.10UE.....	70
7.1.4 Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken.....	71
7.2 REOLOGIE.....	72
7.2.1 Odpadní polyethylen.....	73
7.2.2 Polyethylen Dowlex 2631.10UE.....	74

7.2.3	Plazmově upravený polyetylen Dowlex 2631.10UE	75
7.2.4	Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken	76
7.3	INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ (FTIR)	77
7.3.1	Odpadní polyetylen	78
7.3.2	Polyetylen Dowlex 2631.10UE	80
7.3.3	Plazmově upravený polyetylen Dowlex 2631.10UE	81
7.3.4	Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken	83
7.4	MIKROSKOPIE.....	85
7.4.1	Odpadní polyetylen	86
7.4.2	Polyetylen Dowlex 2631.10UE	88
7.4.3	Plazmově upravený polyetylen Dowlex 2631.10UE	90
7.4.4	Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken	92
7.5	DYNAMICKÁ MECHANICKÁ ANALÝZA (DMA)	94
7.5.1	Odpadní polyetylen	94
7.5.2	Plazmově modifikovaný polyetylen Dowlex 2631.10 UE	95
7.5.3	Srovnání plněného a čistého polymeru	97
7.6	PROPUSTNOST PRO PLYNY	98
7.6.1	Odpadní polyetylen	98
7.6.2	Polyetylen Dowlex 2631.10 UE	98
7.6.3	Plazmově modifikovaný polyetylen Dowlex 2631.10 UE	99
7.6.4	Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken	99
8	VÝSLEDKY.....	100
	TAHOVÁ ZKOUŠKA	100
	REOLOGIE	101
	INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE S FOURIEROVOU TRANSFORMACÍ (FTIR)	101
	MIKROSKOPIE.....	102
	DYNAMICKÁ MECHANICKÁ ANALÝZA (DMA).....	102
	PROPUSTNOST PRO PLYNY	102
9	ZÁVĚR.....	104
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	105
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	110
	SEZNAM OBRÁZKŮ	112
	SEZNAM TABULEK.....	116
	SEZNAM GRAFŮ	117

ÚVOD

Žijeme v době, kdy se hojně využívají plastové výrobky. Když se pozorně rozhlédneme kolem sebe, zjistíme, že jsme obklopeni plasty, které tvoří většinu věcí kolem nás. Bez plastů si nedokážeme představit současný život. Plasty mají velkou řadu předností a nacházejí uplatnění ve všech odvětvích lidské činnosti. Jejich nespornou nevýhodou je však velmi dlouhá doba rozkladu v přírodě. Plasty se však dají poměrně úspěšně recyklovat, dále využívat a nemusí se zbytečně skládkovat či spalovat. [1]

Pojem recyklace pochází z anglického slova „recycling“, tedy znovuvyužití či navrácení zpět do cyklu. Recyklace plastů je ekologický způsob, jak zredukovat nepotřebný odpad a podpořit tak výrobu nových produktů. Recyklace plastů umožňuje čerpat suroviny v případě jejich nedostatku, snížení nákladů při stoupajících cenách primárních materiálů (ropy, zemního plynu) a snížení ekologické zátěže životního prostředí produkovanými odpady. Recyklace také snižuje znečištění ovzduší, vody a půdy v důsledku likvidace odpadu. [2]

Recyklace však nefunguje tak, jak si myslíme. Recyklace nechrání životní prostředí, ale přispívá k menší míře jeho poškozování. Dokáže částečně nahradit některé materiálové zdroje. Jedná se o technologický proces, kterým se snažíme z odpadního materiálu vytvořit opět materiál, pokud možno stejné kvality. Jde o proces, který je náročný na energii a vodu.

Aby recyklace probíhala, nestačí ji pouze zahrnout do plánů. Třídění odpadu a recyklace je v současnosti doslova tím nejmenším, co můžeme v rámci naší konzumní společnosti pro náš vlastní svět udělat. [3]

Má to smysl, buďme ohleduplní a třídíme odpad. Pro někoho je odpad cennou surovinou při výrobě jiného výrobku. Zpracované téma této práce nabízí detailnější pohled do problematiky zpracování recyklovaných materiálů, se kterými se běžně, většinou denně setkáváme.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADNÍ ÚPRAVY ODPADU

Lidskou činností se na planetě Zemi produkuje řada výrobků, služeb a předmětů denní potřeby. Vedle produktů lidské činnosti vzniká i někdy v prvním pohledu už nepoužitelný materiál, odpad. Například při sklizni obilí vzniká jakožto odpad sláma. Tu lze ale dále využít na krmivo či podestýlku hospodářských zvířat, popřípadě pro výrobu topných pelet. Nejde tedy o odpad, ale o druhotnou surovinu.

Druhotná surovina je surovina, která vznikla zejména lidskou činností a mající zejména charakter vedlejších produktů, nebo upravených odpadů, které přestaly být odpadem poté, co splnily podmínky a kritéria materiálů získaných z výrobků podléhajících zpětnému odběru. Druhotná surovina slouží jako vstup pro výrobu a nahrazuje primární surovinu. [4]

K recyklaci polymerních látek lze použít několik rozdílných principů. K recyklačním metodám řadíme tyto tři možnosti: [5]

- a) mechanická recyklace – jedná se o recyklaci použitého materiálu za účelem zisku materiálu „čistého“ [5]
- b) chemická recyklace – jde o degradaci polymeru na monomery, oligomery, paliva či rozpouštědla [5]
- c) energetická recyklace – někdy označována i oxidační, jde o získání a využití uložené energie spalováním [5]

Mechanická recyklace

Tento typ recyklace je někdy nazýván fyzikální recyklací. Jedná se výhradně o přepracování termoplastů (tváření v tavenině), které jsou roztaveny a přepracovány do nových výrobků, částečně pro stejné, nebo jiné použití. Jde především o průmyslový odpad, odřezky či nepovedené výrobky, použité spotřební zboží či části produktů obsahující plastové části. Zásadním problémem při recyklaci plastů je nutnost jejich důsledného třídění, a to především podle druhů. Polymery jsou totiž v zásadě vzájemně nemísitelné. Dalším problémem je násobnost termálního namáhání plastu. Vlivem zvýšené teploty a mechanického působení na taveninu polymeru dochází k degradaci polymeru, což vede především ke snižování molekulové hmotnosti a zhoršení vlastností (zejména mechanických vlastností, zpracovatelských vlastností, barevnosti apod.). [5]

Recyklace plastů může přinášet i jiné problémy, jako je např. nebezpečí požáru ve zpracovatelském zařízení. Zde může na základě mikrobiologických, chemických nebo

fyzikálních procesů v naskladněných odpadech na bázi plastových výrobků z domácnosti vznikat teplo. Vzniklé teplo se může nahromadit tak, že dojde k samovznícení (více u nadrcených odpadů než v odpadech v původní formě). [5]

Chemická recyklace

Jde o řízenou degradaci polymeru s cílem získat zpět uhlovodíky pro použití jako surový materiál pro výrobu nových polymerů. Nejrozšířenější cestou je termická degradace polymeru, při které dochází k trhání kovalentních vazeb v polymeru (dochází k odštěpování substituentů a trhání hlavního polymerního řetězce). Může být prováděna bez přístupu vzduchu jako pyrolytická degradace (jejímž produktem jsou ušlechtilá paliva), nebo jako redukční pyrolýza (souběžné působení tepla, CO a H₂O). V přítomnosti kyslíku probíhá oxidační degradace mechanismem autooxidace, při které vzniká směs kyslíkatých produktů. [5]

U některých polymerů, především vinylových (polymethylmethakrylát (PMMA), polystyren (PS)), probíhá tzv. depolymerace. Jde o děj, kdy při degradaci vzniká velké procento původního monomeru, u PMMA se dosahuje výtěžku monomeru až z 90 %, u PS 71 %. Tento proces je energeticky náročný, a to především ve srovnání s mechanickou cestou recyklace. Na druhou stranu je možno zpracovat různě znečištěný odpad na zcela čistý produkt. [5]

Energetická recyklace

Při tomto nakládání s odpady dochází ke spalování polymerních odpadů s cílem zisku energie. Tento proces významně redukuje objem odpadu. Jako takový je podporován coby alternativa skládkování. Na druhou stranu vede k úplné ztrátě materiálové hodnoty s dalším vlivem na životní prostředí. Spalování polymerních odpadů může mít výhodu v tom, že tyto materiály mají ve srovnání s jinými palivy dobrou výhřevnost, např. severočeské hnědé uhlí má výhřevnost 8 MJ/kg až 12 MJ/kg, avšak polyethylenový odpad má výhřevnost 43 MJ/kg. [5]

Plastový či papírový odpad je velmi objemný. Velký objem, který je nevýhodný především z hlediska manipulace a dopravy, lze zmenšit stlačováním odpadu v lisovacích, pěchovacích, tabletovacích, paketovacích a podobných strojích. [6]

1.1 Použité metody

Lisování odpadu

Pro lisování odpadu se používají vřetenové nebo hydraulické lisy od jednoduchého provedení s ručním plněním lisovacích komor, až po velmi produktivní lisovací zařízení zásobníková s automatickým plněním, stlačováním a převazováním balíků. [6]

Hydraulický lisovací stroj se dělí podle způsobu plnění na horizontální a vertikální.

Horizontální lisovací stroj je vhodný pro zefektivnění provozu recyklace odpadu, kdy se používá pro vyšší výrobní úroveň a automatický provoz. [7]



Obrázek 1 – Horizontální lisovací stroj [7]

Vertikální lisovací stroj je dobrou nízkonákladovou variantou, kdy objem výroby není prioritou. Vertikální lisy mohou balíkovat širokou škálu materiálů. Hydraulické lisy obecně slouží pro objemovou redukci měkkého odpadu v relativně malém prostoru. Lis se používá k redukci měkkého odpadu, tedy kartonu, odpadního papíru a polyethylenových obalů. [7]



Obrázek 2 – Vertikální lisovací stroj [7]

Tabletování (briketování) odpadu

Odpad je stlačován do malé komory působením velké stlačovací síly. Vznikající teplo částečně plastikuje odpad do kompaktního tvaru. Vznikají brikety či tablety různých tvarů jako upravená druhotná surovina. [6]

Ruční třídění odpadu

Ruční třídění odpadu u třídících pásů nebo u třídících stolů je zatím nejpoužívanějším způsobem třídění. Kvalifikované třídičky odpadního papíru či plastu nebyly zatím překonány ani velmi promyšlenými technickými systémy, a to právě pro různorodost odpadu a pro nahodilosti způsobující problémy, které nelze řešit bez vlivu lidského intelektu. [6]

Nejdříve se dovezený odpad zváží a zkontroluje se jeho kvalita. Poté je odpad uskladněn či dopraven pomocí dopravníků do přijímací jámy, odkud je dále dopravován ke třídění jednotlivých druhů. U přijímací jámy je vyřazen nevhodný odpad (nevhodný materiál či nadrozměrné kusy). Finální třídění probíhá ručně na třídícím pásu. Každý člen třídící linky má přiřazeny typy materiálu, na které se má zaměřit. Vytříděné materiály jsou vhazovány do shozů, kde se materiály skladují a čekají na další úpravu. Vytříděné materiály kontroluje správce třídění. Důležitá je homogenita vzorků, poté se zaznamenává hmotnost tříděného materiálu do formuláře. Cílem ručního třídění je tedy roztřídit materiály do příslušných kategorií, aby došlo ke snížení množství neroztříděného odpadu. Nevyužitelný odpad je dopravníkem transportován do kontejneru k dalšímu zpracování či likvidaci. Vytříděný odpad se lisuje do balíků pomocí hydraulických lisů. [8,9]



Obrázek 3 – Třídící linka [9]

V třídárnách se nejčastěji třídí odpad podle:

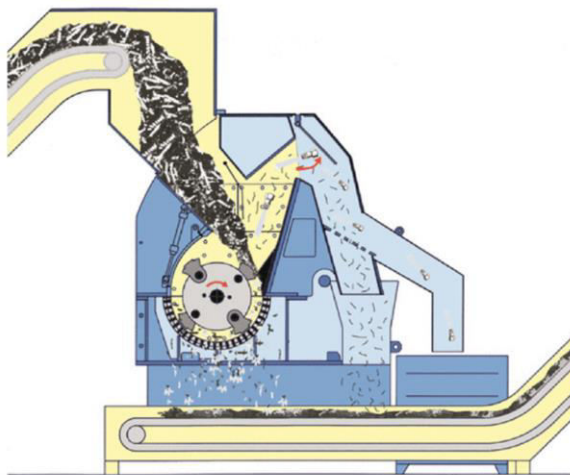
- a) druhu výrobku (formy odpadu) – celkový vzhled odpadu umožňuje určení původu materiálu [6]
- b) stupně znečištění a stupně poškození – vizuální posouzení [6]
- c) barvy – nejmarkantnější rozlišující znak, třídění podle barvy zmenšuje spotřebu drahých pigmentových barviv [6]
- d) způsobu další úpravy – při třídění odpadu pro drcení (mletí) je důležitý odpor, který bude odpad klást při rozměňování na konkrétním typu mlýnu [6]

1.2 Zpracování plastového odpadu

Při použití jednotlivých odpadů k dalšímu zpracování je nutné si uvědomit jejich původ a zvážit, jak byl materiál dříve zpracováván. Záleží také na tom, zda byl materiál pouze drcený či drcený a regranulovaný. Použití pouze drceného materiálu má výhodu u tepelně citlivých materiálů, kdy nejsou znovu tepelně namáhány při regranulaci, avšak nevýhodou je nestejná velikost drcených částí a zvýšený obsah prachových podílů. [10]

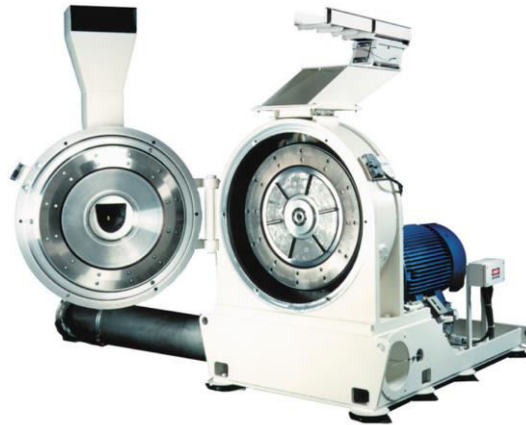
Existuje mnoho různých typů strojního zařízení na zpracování plastového odpadu. Pro hrubé drcení se používají různé typy mlýnů, například nožový či kladivový mlýn, kdy zmenšování rozměrů lze dosáhnout tlakem, smykem či řezem. [10]

Kladivový mlýn je velmi efektivní ke zmenšení velikosti křehkých materiálů. Kladiva na rozdrcení odpadu jsou přišroubované na vysokorychlostní rotační hřídeli, která dosahuje 700 až 1200 otáček za minutu. [11]



Obrázek 4 – Kladivový mlýn [11]

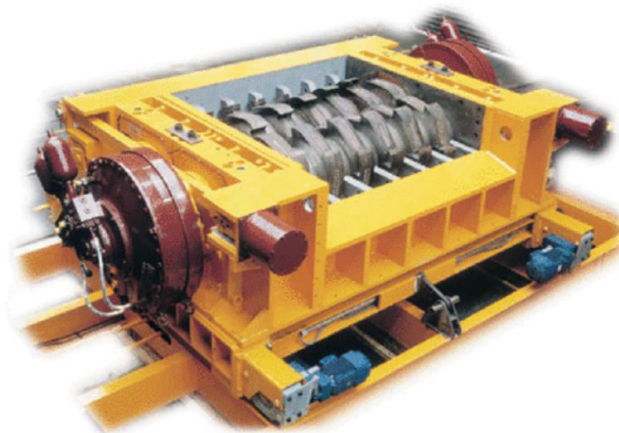
Dále se používá talířový nárazový mlýn, jehož výhodou je schopnost rozemlít materiál na rovnoměrnou zrnitost vhodnou například pro stříkání. Velikost rozemletého materiálu je dána velikostí štěrbin mezi bočnicemi. U talířového mlýna se nepoužívají síta a nedochází k přehřívání materiálu. [10]



Obrázek 5 – Talířový mlýn [12]

Mezi další konstrukce mlýnů patří tzv. „šředry“, z angličtiny Shredder. [11]

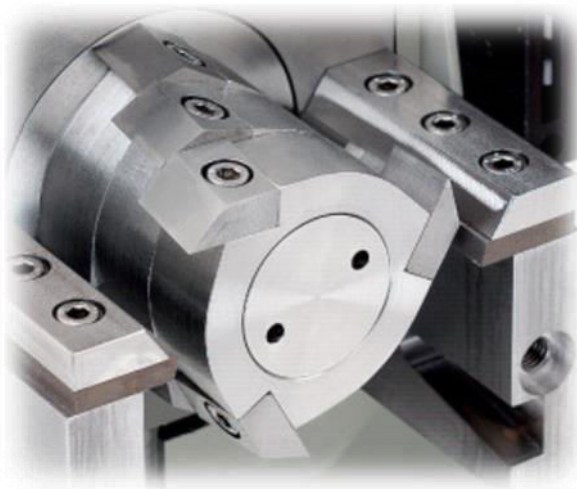
„Šředry“ fungují během provozu jako nůžky, kdy zmenšují velikost materiálu. Obvykle se skládají ze dvou protiběžných paralelních hřídelí, které jsou poháněné hydraulicky nebo pomocí elektrických motorů. Odpadní materiál se přivádí do násypky mezi rotující hřídele a zmenšení velikosti odpadu je dosaženo pomocí stříhání nebo trhání. V případě přetížení či zastavení stroje se provede otáčení hřídelí obráceně a materiál je tak vrácen zpět do násypky stroje. Rychlost otáčení je velmi malá, okolo 50 až 200 otáček za minutu. „Šředry“ se používají pro drcení materiálů na relativně hrubé velikosti částic. Nejsou schopni rozdrtit materiály na jemnou velikost (např. méně než 10 mm). Hlavní výhodou „šředrů“ je, že čím více jsou krmeny materiálem, tím efektivnější jsou, neboť materiál v násypce tlačí objekty dolů, kde jsou zachytávány mezi rotující hřídele a řezací disky. [11]



Obrázek 6 – Shredder [11]

Jedním z nejvíce používaných mlýnů je mlýn nožový s několika noži uloženými radiálně kolem rotoru (tedy na statoru) a pak noži umístěnými přímo na rotoru. Velikost drtě je pak dána velikostí ok síta, které je umístěno v dolní části mlýnu. Výhodou nožových mlýnů je rovnoměrná velikost recyklátu s malým množstvím prachu, snadno se čistí a jemnost je dána velikostí ok síta. [10]

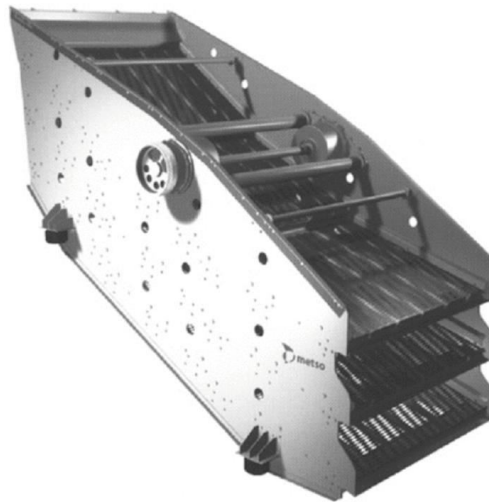
Stroj je určen pro rozměňování pásků, trubek, fólií, desek apod. Nožový mlýn může být použit buď individuálně, nebo může být zařazen do drtící linky. Tato soustava strojů se využívá především tehdy, je-li potřeba materiál rozmělnit na malé částice. [6]



Obrázek 7 – Nožový mlýn [12]

Při výrobě regenerovaných regenerátů se po operaci drcení provádí následné zpracování na hnětacích či šnekových strojích, na které navazuje granulační jednotka. [10]

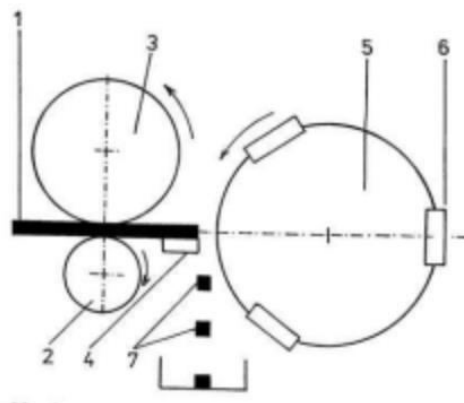
V drtící lince přichází materiál po hrubém drcení v nožovém mlýně elektrickým vibračním podávčem do talířového mlýna. Odtud je drť po rozmělnění pneumaticky přepravována do prosévačky, kde se na vibračních sítích třídí. Tyto vibrační třídíče umožňují oddělení drceného materiálu v závislosti na jeho rozměrech, prostřednictvím separačních sít. Síta jsou vyrobeny z pletiv či kovových plátů, které jsou opatřeny perforovanými otvory. Vibrační třídíče se skládají z nosné konstrukce a jednoho či dvou vibračních sít, které jsou poháněny vibračními motory. [6,11]



Obrázek 8 – Vibrační tříděč [11]

Po vytržení se materiál buď využije ve formě plastového recyklátu na výrobu výrobků pomocí vytlačování či vstřikování, nebo je dále přetvořen do formy granulí tzv. granulací. Pokud je do tvaru granulí převeden recyklovaný materiál, hovoříme o regenerátu. Tvar granulí jsou buď válečky, čočky, krychličky nebo kuličky. [13]

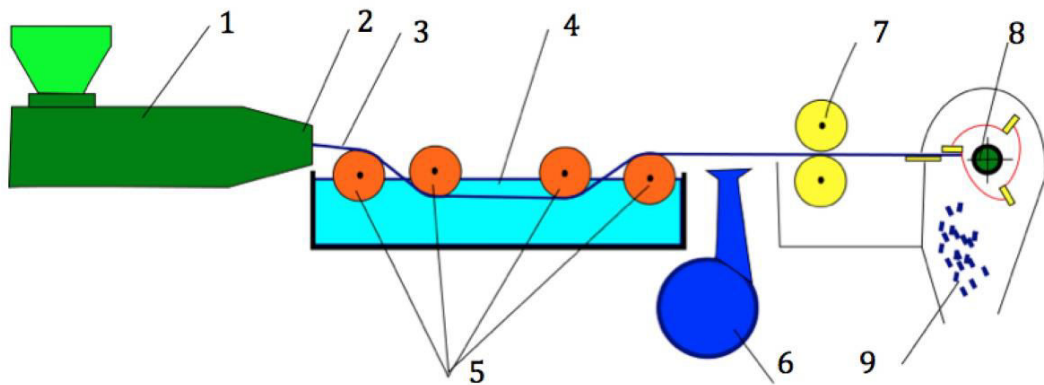
První z možných metod granulace je granulace z pásu. Pásové granulátory, kterými se mohou zpracovávat pouze měkké materiály, např. měkkčený polyvinylchlorid (PVC), vyrábějí granulát z fólií, respektive z desek. Princip granulace je založen na rozřezání materiálu na proužky, které jsou rozsekány na granule. Tento způsob granulace je nevhodný pro tvrdé materiály a je málo produktivní. [13]



Obrázek 9 – Pásový granulátor [13]

1 – pás polymerního materiálu, 2 – podávací buben, 3 – kotoučové řezací nože, 4 – pevně stojící nůž, 5 – buben rotačních nožů, 6 – rotační nože, 7 - granule

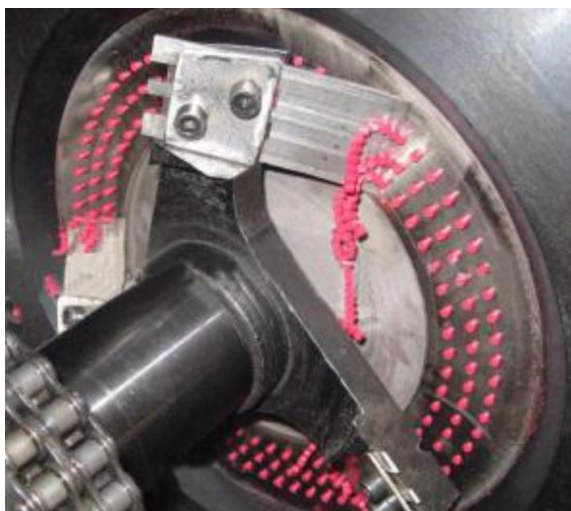
Výkonnější metody jsou založeny na granulaci strun a rozeznáváme buď granulaci za studena nebo granulaci za tepla. Při granulaci za studena jsou struny vytlačené granulační hlavou s mnoha otvory ochlazeny ve vodní lázni a po odstranění přebytečné vody jsou sekány na granule. Nevýhodou této granulace je nemožnost použití v případě velkého množství strun, které se mohou slepovat a lámat. Výkon linek používající granulaci za studena je kolem $2000 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. [10,13]



Obrázek 10 – Granulace za studena [14]

1 – šnekový vytlačovací stroj, 2 – víceotvorová granulační hlava, 3 – struny vytlačovaného plastu, 4 – chladicí lázeň, 5 – vodící válečky, 6 – ventilátor, 7 – podávací válečky, 8 – nožový granulátor, 9 – granule

Při granulaci za tepla (neboli za horka) jsou granule seřezávány přímo z čela granulační hlavy s mnoha otvory. Granule pak odstředivou silou odlétávají do chladicí vany. [10,13]

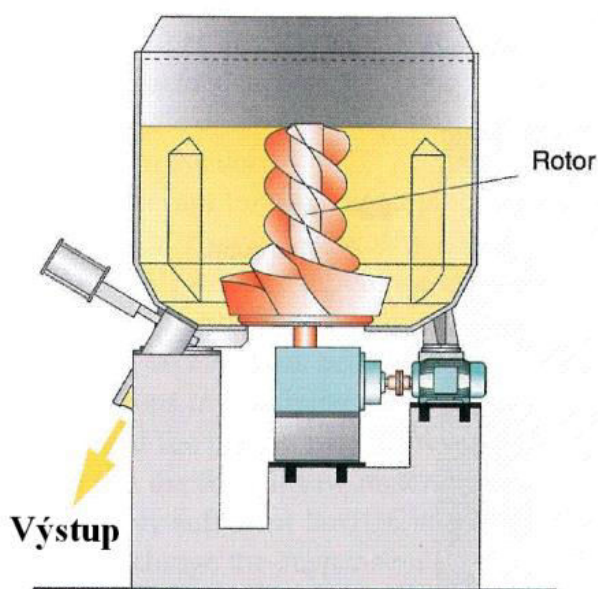


Obrázek 11 – Granulace za tepla [14]

1.3 Metody recyklace odpadního tetrapaku

1. Vířivé rozvlákňování

Před použitím by měl být sběrový papír vhodně uskladněn, aby nedocházelo k jeho znehodnocení vlivem povětrnostních vlivů. Sběrový papír je expedován do papírenských provozů ve formě balíku o hmotnosti 100 kg až 500 kg. Následně je sběrový papír kladen pomocí vysokozdvizných vozíků na dopravník, na němž obsluha odstraní vázací drát či rozprostře sběrový papír na dopravní pás. Dopravník může být opatřen vážícím zařízením, které slouží k odměření potřebného váhového množství sběrového papíru k dosažení požadované konzistence papírenské suspenze uvnitř rozvlákňovače viz Obrázek 12. [15]

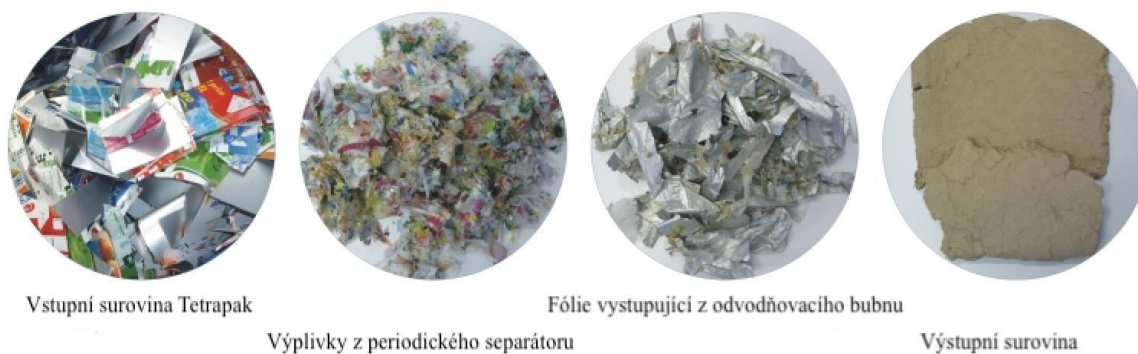


Obrázek 12 – Rozvlákňovač [15]

Za pomoci vody a rotace dojde k rozpuštění papíru na vlákna a jejich zachycení na sítích. Při tomto procesu se z balíků sběrového papíru uvolňují také různé těžké nečistoty (různé kusy železa, kancelářské sponky atd.), které zůstávají na dně rozvlákňovače. K odstraňování těchto nečistot slouží různé typy zařízení, například periodický separátor nečistot. Hliník a polyethylen se pak dále využívají například při spalování k výrobě energie nebo se hliník odděluje pyrolýzou. [6,15]

Rozvlákněná papírová suspenze se z vany rozvlákňovače čerpá do míchací nádrže. S ohledem na další zpracování ve výrobní lince a jeho využití pro výsledný produkt, musí rozvlákněný papír projít dovlákňovacím a třídícím procesem. [15]

Zpracování recyklovaného papíru je definováno konečným použitím. Regenerované vlákno viz Obrázek 13 se v EU používá na výrobu obalového materiálu a průmyslového papíru. [16]



Obrázek 13 – Rozvlákňování tetrapaku [25]

Papír lze v papírenském průmyslu z tohoto typu nápojových kartonů snadno recyklovat. Zbývající vedlejší produkt LDPE a hliník však nelze snadno oddělit na jeho složky, takže v současné době je většinou používán k energetickému využití. V dnešní době se ale řada vědeckých pracovníků snaží vyvinout efektivní proces, který oddělí a získá LDPE a hliník vysoké čistoty a dobré kvality. Za tímto účelem se po regeneraci papíru rozvlákněním ve vodě oddělí LDPE a hliník a pomocí procesu selektivního rozpouštění a srážení se získá LDPE. Mnohé studie ukazují, že proces separace je účinnou metodou pro získání LDPE a hliníku, avšak tato oblast ještě není plně probádána a více o této problematice se dozvíme za pár let. [17]

2. Kompostování

Kompostování je především biooxidativní proces, při kterém za zejména aerobních podmínek dochází k přeměnám organických látek na oxid uhličitý (CO_2), vodu (H_2O), minerální soli a sekundární humusové látky. Přeměnu organické hmoty zajišťuje mnoho aerobních a anaerobních mikroorganismů a vyšších organismů. Průběh kompostování určuje řada faktorů, jako jsou aktivita a druhy mikroorganismů, skladba kompostu, pH, teplota, vlhkost. [18]

Na Obrázku 14 vidíme kompostárnu, kde se papír vlivem biooxidativního procesu rozloží.



Obrázek 14 – Kompostárna [19]

Nerozložený hliník a polyetylen se následně prosejí pomocí rotačního síta zobrazeného na Obrázku 15.



Obrázek 15 – Rotační síto [19]

3. Lisování desek

Nápojové kartony jsou dotříděny, následně rozdrceny, sušeny a za vysokých teplot lisovány mezi kartonové papíry, kde se polyethylen stává vlivem teploty pojivem. Vzniklé desky viz Obrázek 16 se následně řežou na příslušné formáty. [20]

Vzhledem ke složení potravinářských kartonů ze tří základních prvků: celulózy, hliníku a polyethylenu, získávají takto vyrobené desky z recyklovaného materiálu zajímavé vlastnosti. Například polyethylen se během výrobního procesu stává pojivem a uzavírá strukturu produktu před působením vody. V praxi to znamená průnik vlhkosti ve výši pouhého 1 %. Dále za zmínku stojí bobtnání, které je až o polovinu menší než u desek na bázi dřeva. [20]



Obrázek 16 – Deska PACKWALL [20]

4. Plnivo

Jako další metoda recyklace se nabízí využít odpadní tetrapak (bez přítomného kartonu) jako plnivo. Jelikož odpadní tetrapak obsahuje až 20 % polyethylenu (LDPE) a 5 % hliníku, lze očekávat, že bude vhodný k plnění různých typů polyethylenů. Bližší problematikou této metody recyklace odpadního tetrapaku se zabývá tato práce.

Při zpracování odpadního tetrapaku a odpadního polyethylenu vzniká našedlý produkt. Toto zbarvení propůjčuje materiálu přítomný hliník. Takto vzniklý našedlý produkt lze použít k okamžitému použití např. na lisování desek.

V 21. století se v architektuře, ale i v jiných odvětvích často využívá bílých a šedých prvků jak v interiéru, tak exteriéru. Šedá barva v lidech evokuje vlastnosti typu nenápadnost, neurčitost a jejich nositele: kouř a mlhu. Bílá barva je chápána jako symbol čistoty, nevinnosti a radosti. [21]

Materiál plněný odpadním tetrapakem lze využít jako dekorativní předměty v exteriéru či interiéru, ochranné desky městského mobiliáře – opláštění vnější kostry odpadkových košů, boční stěny zastávek linkových autobusů a jiné využití, zkrátka všude tam, kde aplikace daného produktu nenarušuje ráz krajiny, nebo nenarušuje celistvost budov, neboť šedá barva propůjčuje předmětům nenápadnost.



Obrázek 17 – Opláštění vnější kostry odpadkového koše [22]

2 MATERIÁLY

Mnohé produkty sloužící buď jako obalový materiál či předměty denní potřeby jsou vyrobeny z různých materiálů a po využití člověkem končí svůj životní cyklus jako odpad. Odpad je pro někoho cenou druhotnou surovinou viz Kapitola 1. Tato kapitola se zabývá popisem zpracovávaných materiálů a jejich popisem vlastností, které splňovaly, než se staly odpadním materiálem.

2.1 Tetrapak

Jedná se o balení pro tekutiny, které je vyrobeno z lepenky nebo podobného materiálu, který je alespoň na jednom svém povrchu nepropustný pro kapalinu na základě plastového povlaku. Toto balení má boční stěny, spodní a horní stěnu, které jsou spolu spojeny přehybem nebo těsníci švy. Aby se umožnilo vyprázdnění obsahu balení z obalu, jsou balíčky opatřeny otevíracími (odlévacími) prostředky. Odlévací otvor je umístěn v horní stěně tohoto balení. [23]



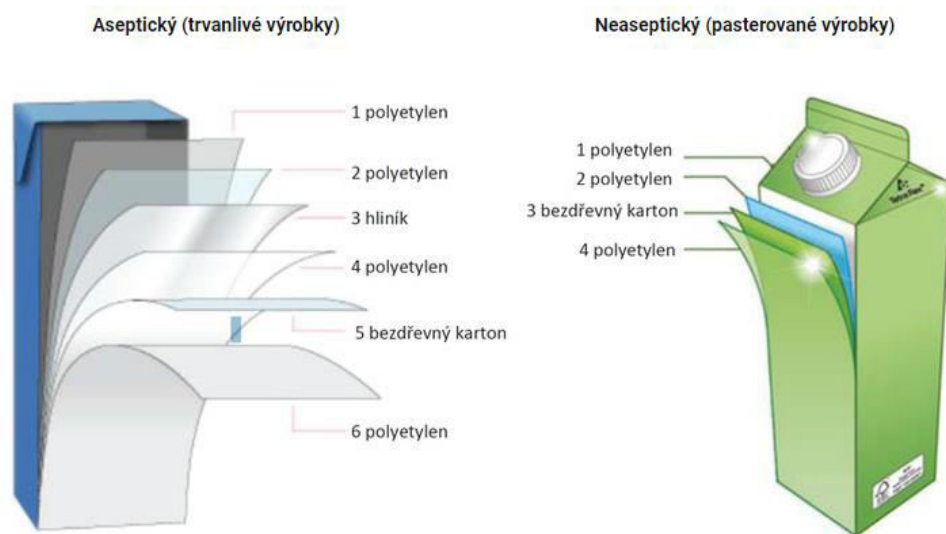
Obrázek 18 – Balení pro tekutiny [24]

Složení nápojového kartonu tedy tvoří 70 % až 85 % karton, 20 % polyethylenu, který je nepropustný pro vodu a mikroorganismy a 5 % hliníku, jenž chrání před světlem, kyslíkem a bakteriemi. [24]

Nápojový karton, například obal od džusu či trvanlivého mléka je složen z 6 vrstev, kdy každá vrstva plní určitou funkci. Aseptické ošetření a unikátní složení obalu umožňuje uchování potravin po dlouho dobu, bez přidání konzervantů. [24]

Existují dvě základní skupiny obalů na tekuté nápoje:

- přibližně 80 % celkové produkce představují šestivrstvé obaly na aseptické trvanlivé balení pro skladování za normálních teplot, obsahující přibližně 75 % papíru a kartonu, asi 20 % polyethylenu (LDPE) a 5 % hliníku [25]
- přibližně 20 % jsou zastoupeny 3-4 vrstvé neaseptické chladírenské obaly s obsahem asi 80 % papírenských materiálů a zhruba 20 % polyethylenu (LDPE) [25]



Obrázek 19 – Ukázka struktury aseptického a neaseptického nápojového kartonu [24]

2.2 Polyolefiny

Polyolefiny jsou plastické hmoty, které vznikají polymerací olefinů. Olefiny jsou uhlovodíky, tj. sloučeniny uhlíku s vodíkem, obsahující v řetězci jednu dvojnou vazbu. V plastikářském průmyslu je olefin běžným pojmem, který označuje skupinu plastů na bázi ethylenu a propylenu. Termín polyolefin se vztahuje na polymery vyrobené z alkenů, ať už homopolymery nebo kopolymery. Polyolefin tedy zahrnuje skupinu polyethylenu a polypropylenu. [26]

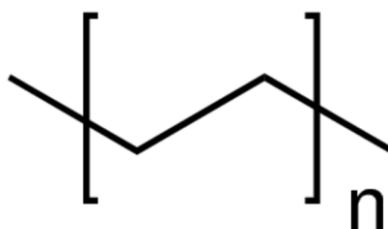
Monomery pro výrobu polyolefinů se běžně získávají z benzinové ropné frakce krakováním v přítomnosti vodní páry. Čím dál větší význam má jejich výroba ze zemního plynu, respektive z plyných směsí odpadajících při rafinaci ropy. Tato výroba totiž dává vyšší výtěžky než postup používající ropné frakce. [26,27]

2.2.1 Polyethylen (PE)

Polyethyleny jsou obecně materiály nerozpustné v rozpouštědlech pod 50 °C až 60 °C, ale nad 70 °C jsou typy s nízkou hustotou rozpustné v mnoha rozpouštědlech. Nejúčinnějším rozpouštědlem je tetrachlormethan. [28]

Polyethyleny se narušují silnými oxidujícími kyselinami (např. kyselina dusičná, koncentrovaná kyselina sírová či lučavka královská). Mezi rozpouštědla způsobující bobtnání PE patří např. benzin. [27]

Všechny typy polyethylenu jsou značně citlivé na působení UV záření a pro venkovní použití je nutné je stabilizovat. Přehled některých typů polyethylenu viz Tabulka 1. [27]



Obrázek 20 – Vzorec PE [29]

Standartní způsob spojování PE je svařování. Všechny typy PE jsou obtížně lepitelné, vyžadují povrchovou úpravu nebo použití zcela speciální lepidla schopná sama povrchovou úpravu materiálu provést. [27]

Tabulka 1 – Porovnání různých druhů nezesíťovaných polyethylenů [27]

	LDPE	LLDPE	HDPE (1)	HDPE (2)
Hustota (23 °C) [g/cm ³]	0,933	0,935	0,953	0,956
Index toku taveniny [g/10 min]	0,3	0,6	0,45	0,22
Mez kluzu [MPa]	1,5	11	21	23
Protažení na mezi pevnosti [%]	500	>600	10	9
Modul pružnosti E [MPa]			800	900

LDPE – Bralen Z-2301-014, **LLDPE** – Borealis LE 2405, **HDPE (1)** – Hostalen GM 5010 T2, **HDPE (2)** – Hostalen CRP 100

K tepelnému odbourávání PE dochází při teplotách okolo 290 °C, tj. nad oblastí teplot zpracování. V přítomnosti kyslíku se rychlost tepelné degradace zvyšuje. Tepelně oxidační degradace polymeru vyvolává vznik gelovitých částic, které zejména při výrobě fólií mohou způsobovat trhání fólie a změnu fyzikálních vlastností. [30]

Rozvětvený polyethylen zpracováváný technologií vstřikování může být až dvanáctkrát vrácen do technologického procesu, aniž by se výrazně změnila jeho mechanické vlastnosti.

Polyethylen patří mezi nejvhodnější polymery pro opakované zpracování, tedy pro primární zhodnocení odpadu jako druhotné suroviny. [30]

V dnešní době je polyethylen (PE) jedním z nejpoužívanějších polymerů. Výroba a zpracování polyethylenu se v posledním desetiletí významně navyšuje. Důvodem tohoto nárůstu je expanze tohoto polymeru do nových průmyslových odvětví. Rostoucí spotřeba polyethylenu přináší zvýšený zájem a aktivity spojené s využíváním recyklovaných materiálů. [30]

Během recyklace je PE vystavován opakovaným cyklům zpracování v kombinaci s obdobím stárnutí, tedy obdobím, kdy je polymer používán jako výchozí produkt. Aby byla zajištěna kvalita finálních produktů vyrobených z recyklovaného materiálu, je potřeba zkoumat vlastnosti opakovaně zpracovávaného materiálu a rozumět tomu, aby bylo možné předpovídat jeho chování během zpracování a chování produktu během následujících životních cyklů. [30]

2.2.1.1 Nízkohustotní polyethylen (LDPE)

Nízkohustotní polyethylen je nejstarším z vyráběných typů polyethylenů. Začala ho vyrábět britská firma ICI v roce 1939. Zkratka LD znamená Low Density = nízká hustota a je charakterizován četnými rozvětvenými. [27]

Tabulka 2 – Vlastnosti LDPE [26]

Hustota [g/cm ³]	0,910–0,925
Teplota skelného přechodu (T _g) [°C]	-120
Teplota tání (T _m) [°C]	105–115
Pevnost v tahu [MPa]	8,2–31,4
Absorpce vody [%]	<0,01

Vyrábí se z ethylenu s přídavkem max. 0,1 % kyslíku, který působí jako katalyzátor, za tlaku 150 MPa až 300 MPa a teploty kolem 200 °C. Reakce je exotermní a vyžaduje intenzivní chlazení. Kyslík se při reakci spotřebovává a reakce tedy proběhne jenom asi z 15 %. Reakce totiž po spotřebování kyslíku ustává. Po snížení tlaku se vyloučí vzniklý polyethylen a ethylen se znovu komprimuje a vrací do procesu. Není možné použít větší množství kyslíku, protože už při 0,16 % je směs kyslíku s ethylenem výbušná. V dnešní době se LDPE vyrábí buď v trubkových reaktorech, nebo v míchaných autoklávech. Místo kyslíku se používají jako katalyzátory často organické peroxidy. Protože se při výrobě LDPE nepoužívají katalyzátory s obsahem kovů, je tento materiál vhodný pro aplikace v oboru medicíny, farmacie a polovodičů, kde i stopy kovů mohou způsobit nepříjemnosti. [26,27]



Obrázek 21 – Označení nízkohustotního polyethylenu [3]

2.2.1.2 Vysokohustotní polyethylen (HDPE)

Vysokohustotní polyethylen HDPE (nízkotlaký, lineární), je nejrozšířenější typ polyethylenu. HDPE je druhým nejčastěji používaným obalovým plastem. Je mléčně bílý, nepolární termoplast, má téměř úplně lineární strukturu, to má za následek vyšší hustotu a větší schopnost krystalizovat. [26]

Tabulka 3 – Vlastnosti HDPE [26]

Hustota [g/cm^3]	0,94–0,965
Teplota skelného přechodu (T_g) [$^{\circ}\text{C}$]	-120
Teplota tání (T_m) [$^{\circ}\text{C}$]	128–138
Pevnost v tahu [MPa]	17,3–44,8
Absorpce vody [%]	<0,01

Při nízkotlakém provedení je polymerace umožněna použitím speciálních katalyzátorů při malých tlacích. Původní postupy okolo roku 1955 používaly tzv. Zieglerovy katalyzátory, což je v podstatě směs alkylaluminia s chloridem titaničitým. Tyto katalyzátory umožnily zvýšit hustotu na $0,97 \text{ g/cm}^3$. [30]

V současné době se často používají i katalyzátory na bázi oxidů chromu. Ve všech případech se ale pracuje s tlakem blízkým normálnímu, maximálně však 4 MPa. Takto získaný materiál může mít \bar{M}_w mezi 50 000 až 300 000, krystalického podílu až 80 % a hustotu $0,945 \text{ g/cm}^3$ až $0,955 \text{ g/cm}^3$. Takový materiál taje v rozmezí asi $120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ až $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [26,27]

HDPE snáší dobře nízké teploty, při $-50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ještě není křehký. HDPE se vyznačuje dobrými bariérovými vlastnostmi proti vlhkosti a špatnými bariérovými vlastnostmi vůči kyslíku, proto je nejčastěji používaný materiál pro trubky a součásti potrubí na pitnou vodu, na izolační fólie apod. Má vynikající odolnost vůči širokému spektru chemických sloučenin např. alkoholy, aceton, ketony, zředěné kyseliny a zásady. Neodolává působení aromatických uhlovodíků, např. benzenu. [26]



Obrázek 22 – Označení vysokohustotního polyethylenu [3]

2.2.1.3 Polyethylen Dowlex 2631.10UE

Polyethylen od společnosti Dow Chemical Company je vyráběn v práškové formě. Tento polyethylen je speciálně navržen pro aplikace vyžadující vynikající zpracovatelnost v kombinaci s nízkou deformací a dobrými mechanickými vlastnostmi. [31]

Polyethylen Dowlex s označením 2631.10UE je plně tepelně i UV stabilizován, což má za následek velkou škálu zpracování, dobrou retenci barev a dlouho životnost. Je vhodný zejména pro rotační lití a vstřikování. [31]

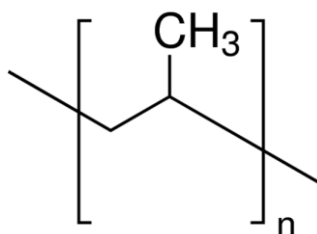
Tabulka 4 – Vlastnosti polyethylenu Dowlex 2631.10UE [31]

Hustota [g/cm^3]	0,935
Index toku taveniny (ITT, MFI) ($190\text{ }^\circ\text{C}/2,16\text{ kg}$) [$\text{g}/10\text{ min}$]	7,0
Pevnost v tahu [MPa]	17,8
Tvrдость Shore (Shore D, lisovaná deska)	56
Teplota tání (T_m) [$^\circ\text{C}$]	124

Polyethylen Dowlex 2631.10UE se běžně používá na výrobu hraček, technických výlisků, plochých nádob a karavanových nádrží. [31]

2.2.2 Polypropylen (PP)

Polypropylen je polyolefin, částečně krystalický nepolární termoplast. Vyrábí se z propenu (propylenu), plynu získávaného obvykle krakováním lehkých ropných podílů. [27]



Obrázek 23 – Vzorec PP [29]

Pro polymeraci je nutné jej vyčistit nejméně na 95,5 %. Samotná polymerace se klasicky provádí pomocí Ziegler-Nattových katalyzátorů. Metallocenové katalyzátory mají pro polypropylen neobyčejný význam. Umožňují snadnou výrobu nejrůznějších kopolymerů, které se zatím jinak nepodařilo připravit. [26,27]

Tabulka 5 – Vlastnosti PP [26]

	Neorientovaný PP	Orientovaný PP
Hustota [g/cm ³]	0,902	0,902
Teplota skelného přechodu (T _g) [°C]	-10	
Teplota tání (T _m) [°C]	160–175	
Pevnost v tahu [MPa]	31–42	50–165
Absorpce vody [%]	0,01–0,03	

Podobně jako u PE se přibližně 40 % celkové výroby spotřebovává v obalové technice, dále 20 % v elektrotechnice a automobilovém průmyslu a přibližně 20 % v oboru textilním. Ve zbytku je obsažen spotřební průmysl, jako například desky, trubky, kancelářský a zahradní nábytek. [27]

Jedná se o částečně krystalický materiál (přibližně 60 %), krystaluje však velmi neochotně. Roztavený PP má tendenci zůstat při ochlazování v tekutém stavu i pod svou teplotou tuhnutí a obvykle krystalizuje až v rozmezí teplot 105–108 °C. Krystalizačními centry jsou zpravidla zbytky katalyzátorů a nečistoty. Pro zlepšení krystalizace se přidávají buď jemnozrné inertní materiály (např. mastek, křída, saze) působící jako zárodky pro vznik jednotlivých krystalů, nebo materiály rozpustné v tavenině PP, které začínají krystalizovat již při teplotě tuhnutí PP (okolo 160 °C) a strhují ke krystalizaci i PP. [27]

Tabulka 6 – Základní vlastnosti jednotlivých stereoizomerů polypropylenu [27]

	Izotaktický PP	Ataktický PP	Syndiotaktický PP
Hustota [g/cm^3]	0,905–0,920	0,850–0,900	0,890–0,910
Teplota tání krystalitů [$^{\circ}\text{C}$]	165	nemá	135
Mez kluzu	vysoká	velmi nízká	střední
Rozpustnost při 20 $^{\circ}\text{C}$ v uhlovodících	nerozpustný	snadno rozpustný	středně rozpustný

PP je dobře svařitelný, všechny základní typy, tj. PP-H (homopolymer), PP-B (block copolymer) a PP-R (random copolymer) jsou mezi sebou svařitelné. PP je odolný proti značně koncentrovaným minerálním anorganickým kyselinám a zásadám, alkoholu a některým olejům. PP bobtná v aromatických a alifatických uhlovodících jako je benzin, benzen. Odolnost proti vlivům povětrnosti, zvláště UV záření je malá. Polotovary z PP se tedy musí proti jeho působení stabilizovat. [27,32]

Polypropylen je značně náchylnější k tepelně oxidační degradaci než polyethylen. Proto při zpracování se prakticky nezpracovává bez přídavku antioxidantu. Při vytlačování se teploty pohybují okolo 250 $^{\circ}\text{C}$ až 300 $^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k těmto teplotám je třeba před každým opakovaným zpracováním odpadu kontrolovat stupeň degradace, protože opakovaným zpracováním polyolefinů se zužuje distribuce relativních molekulových hmotností. Následek užší distribuce u regenerovaných polyolefinů je mírné zmenšení narůstání profilu za hubicí. [30]

Navzdory blízkému příbuzenství s PE se PP od PE odlišuje:

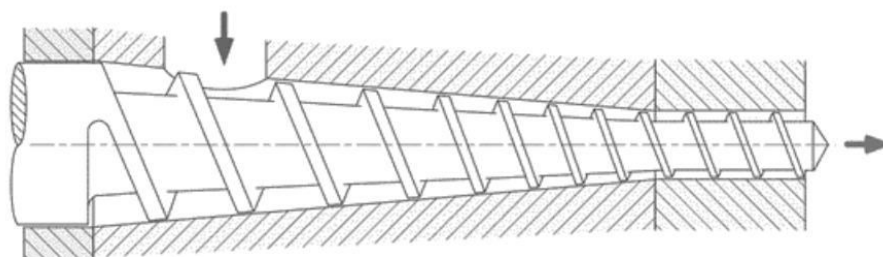
- nižší hustotou (0,91 g/cm^3), vyšší teplotou tavení a větší tvarovou stálostí za tepla [27]
- PP je citlivější vůči oxidaci i povětrnostnímu stárnutí [27]
- PP má menší propustnost pro páry a plyny [27]

3 METODY HODNOCENÍ

Úvodní část této kapitoly pojednává o výrobě a míchání materiálů. Následující část kapitoly popisuje metody, pomocí kterých se v běžné praxi provádí hodnocení vlastností polymerních materiálů.

3.1 Míchání pomocí vytlačovacího stroje

Technologie vytlačování (extruze) je jednou z nejproduktivnějších metod zpracování. Extrudér (vytlačovací stroj) je nepochybně nejdůležitějším strojním zařízením v plastikářském průmyslu. Extrudovat znamená tlačit nebo vytlačovat. Extrudér využívá k roztavení plastu šnek, který se otáčí uvnitř vyhřívaného válce. Šnek je hlavní a nejdůležitější součástí vytlačovacího stroje, jde o tyč se závitem. Tento závit klesá s délkou šneku a podle počtu šneků se extrudéry dělí na jednošnekové a dvoušnekové. Šnek bývá vyroben z chemicky odolné oceli a existuje mnoho druhů šneků, druh šneku je volen podle materiálu, pro který je daný šnek určen. Například šnek určený pro zpracování PVC nebude vhodný pro zpracování kaučukové směsi. [33,34]



Obrázek 24 – Detail šneku uvnitř vytlačovacího stroje [33]

Extruze je proces, při kterém materiál prochází plasticou deformací působením síly, která způsobí, že tento materiál protéká otvorem či matricí. Roztavený plast se tedy protlačuje matricí, aby se vytvořil požadovaný kontinuální tvar produktu (např. struna). Jinak řečeno, materiál přijímá profil průřezu matrice a pokud má materiál vhodné vlastnosti, tento tvar si udrží v konečném extrudátu. Síla potřebná pro tento proces se obvykle dosahuje rotujícím šnekem či pohybujícím se pístem. [33,35]

Hlavní systémy pohonu vytlačovacího stroje jsou:

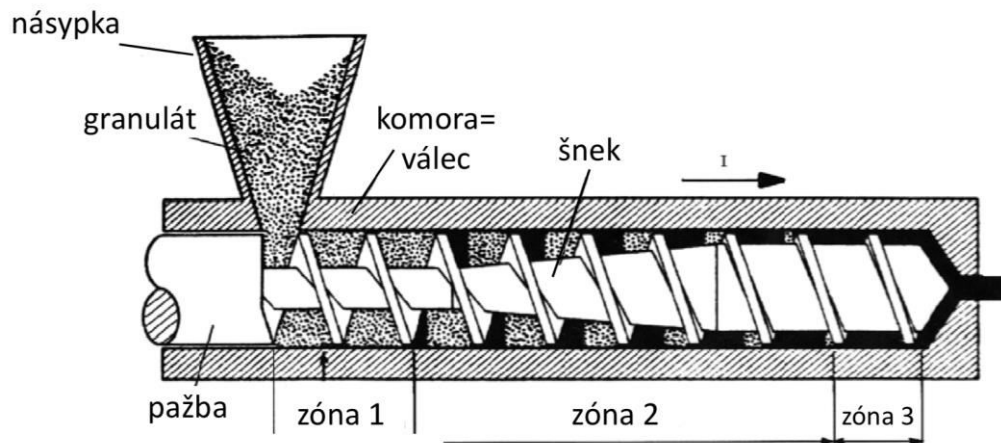
- a) pohon stejnosměrným motorem [33]
- b) pohon střídavým motorem [33]
- c) hydraulický pohon [33]

Extruze tedy probíhá tak, že pomocí teploty a tlaku je materiál (např. granulát či prášek, vločky, kombinace těchto forem) roztaven, pomocí jednoho či více šneků je vytlačen (extrudován) do výsledného tvaru a v chladicí vaně je ochlazen, případně osušen a následně granulován pomocí granulovačného zařízení. [33,35]

Abychom pochopili proces vytlačování, nestačí znát hardware aspekty stroje, ale je zapotřebí také znát a ocenit vlastnosti vytlačovaného materiálu. Vlastnosti vytlačeného materiálu určuje do značné míry správná konstrukce stroje a chování procesu. V systému jsou důležité dvě hlavní třídy vlastností, a to reologické vlastnosti a tepelné vlastnosti. [33]

Reologické vlastnosti popisují, jak se materiál deformuje, když je aplikováno určité napětí. Reologické vlastnosti sypkého materiálu jsou důležité v oblasti násypky extrudéru. Mezi nejdůležitější vlastnosti sypkého materiálu patří sypná hmotnost, koeficient tření, velikost a tvar částic. Z těchto vlastností lze přiměřenou přesností popsat dopravní chování sypkého materiálu. Reologické vlastnosti taveniny polymeru jsou důležité v zóně plastikace, zóně dopravy taveniny a na výstupu při tváření pomocí matrice. Znalost tokových vlastností polymerní taveniny je velmi důležité při analýze vytlačovacího procesu, kdy vlastnosti polymerního toku taveniny určují do značné míry charakteristiky procesu vytlačování. Znalost vlastností toku taveniny umožňuje přesnou optimalizaci konstrukce šneku a provozních podmínek procesu. Pokud vlastnosti toku taveniny nejsou známy, stává se výběr šneku uvnitř extrudéru a stanovení provozních podmínek procesu procesem pokusů a omylů. [33]

Tepelné vlastnosti umožňují predikci teplotních změn v polymeru a popisují, jak polymer reaguje na teplotní změny. U polymerních materiálů se setkáváme s jejich typickou vlastností, viskozitou. Viskozita je odpor kapaliny vůči smykovému toku a při smykovém toku se disipuje energie. Disipace je přeměna mechanické energie na energii tepelnou, tedy čím je větší viskozita, tím je větší disipace. [33,36]



Obrázek 25 – Vytlačovací stroj [35]

Vlastnosti vytlačovacího stroje:

- místně i časově rovnoměrný transport taveniny (bez pulsací) [35]
- homogenní promíchání polymeru se všemi přísadami [35]
- velká vytlačovací výkonnost úměrná otáčkám šneku, vytlačení výrobku bez pórů a bublinek (z vlhkosti) [35]

Pro zlepšení homogenizaci taveniny se využívají tzv. míchací elementy, které zajišťují homogenizaci taveniny (žádné neroztavené kousky), teplotního profilu a tokové historie.

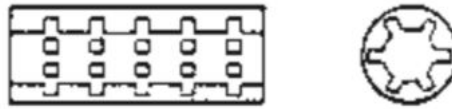
Míchací elementy se dělí na disperzní a distributivní. [36]

Principem disperzního míchacího elementu je homogenizace pomocí vysokých smykových rychlostí (tok úzkou štěrbinou). Tedy štěrba mezi míchacím elementem a obalem šneku je velmi malá, intenzita smykové rychlosti je velká, pokud bude tavenina s plnivem, tak aglomerát je vystaven velké smykové rychlosti a rozpadá se na menší částice, dochází k homogenizaci. Poloha částic se však po průchodu disperzním elementem nezmění. [36]



Obrázek 26 – Disperzní míchací element [37]

U distributivního míchacího elementu je základem homogenizace rozdělení toku pomocí přepážek. Poloha částic se po průchodu distributivním elementem velmi mění. Po průchodu míchacím elementem je teplotní pole více homogenní. [36]



Obrázek 27 – Distributivní míchací element [37]

Jelikož jednošnekové extrudéry nedokáží dokonale míchat taveninu po celé délce šneku a pro zvýšení výkonnosti je nutné zvětšit průměr šneku nebo počet otáček, což vede ke zvýšenému tření a smykovému namáhání materiálu, nelze je používat jako kontinuální hnětiče. V takových případech se využívají tzv. dvoušnekové extrudéry, které dosahují vyšší efektivity míchání a přeprava materiálu je doprovázena mnohem menším třením. U většiny dvoušnekových extrudérů zasahují šneky do sebe a dělí se podle směru otáčení šneků na extrudéry protiběžné a souběžné. [34]

Protiběžné dvoušnekové extrudéry dosahují menší efektivity míchání než souběžné, ale vytvářejí strmější nárůst tlaku podél šneku. Souběžné extrudéry pracují při přibližně pětinasobně vyšších otáčkách než protiběžné, což klade velké nároky na pohon, ale dosahují zároveň většího vytlačovacího výkonu. [34]



Obrázek 28 – Uspořádání šneků, stejnoběžné (vlevo), protiběžné (vpravo) [38]

3.2 Tahová zkouška

Tahové charakteristiky materiálu jsou jeho nejzákladnějšími mechanickými charakteristikami. Jedná se o nejstarší laboratorní zkoušku, neboť první zmínky jsou datovány do 15. století, kdy Leonardo da Vinci zkoušel pevnost konopných lan právě jednoduchou tahovou zkouškou. Jestliže je zkušební těleso vystaveno jednoosému namáhání v tahu, je možné průběh deformace, respektive poměrného prodloužení v závislosti na normálovém napětí sledovat pomocí deformační křivky, která poskytuje důležité informace o vlastnostech materiálu. Tato závislost je určována experimentálně. Zkušební těleso je uchyceno do čelistí zkušebního stroje a na těleso je nasazen průtahoměr (extenzometr). V průběhu zkoušky se zaznamenává závislost působící síly (F), resp. napětí (které je snímáno dynamometrem) na poměrném prodloužení zkušební vzorku (snímáno extenzometrem). [39]

Pro výpočet tzv. smluvního napětí (σ) platí rovnice (1):

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

Kde:

F – velikost působící síly [N]

S_0 – původní průřez zkušební tělesa [mm^2]

Pro výpočet poměrného (relativního) prodloužení (ε) platí rovnice (2):

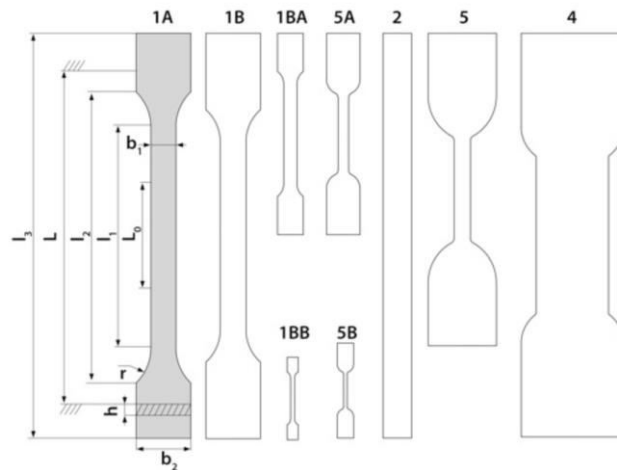
$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

Kde:

ΔL_0 – zvětšení počáteční měřené délky [mm]

L_0 – počáteční měřená délka zkušební tělesa [mm]

Tvar a rozměry zkušebních těles jsou přesně definovány normou pro konkrétní materiál. Většinou jsou však používána tělesa ve tvaru oboustranných lopatek, která umožňují dostatečně pevné uchycení vzorku v čelistech a napětí je přitom koncentrováno do zúžené části vzorku, viz Obrázek 29. [39]



Obrázek 29 – Tvary zkušebních těles [40]

Z deformační křivky určujeme pevnostní charakteristiky jako je mez pevnosti, napětí na mezi kluzu a napětí při přetržení. [39]

Mez pevnosti (pevnost v tahu) (σ_m) je maximální napětí v tahu, které odpovídá největší síle (F_{max}) naměřené v průběhu zkoušky a jeho hodnota je stanovena na základě rovnice (3). [39]

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Mez pevnosti (pevnost v tahu) nemusí vždy souhlasit s napětím v okamžiku přetržení zkušebního tělesa, neboť jeho hodnota se u plastů pohybuje při standartní teplotě okolí v rozmezí od 15 MPa do 100 MPa (u vyztužených plastů až do 170 MPa). [39]

Napětí na mezi kluzu (σ_K) je napětí, při kterém začíná vznikat plastická (trvalá) deformace a začíná se tvořit tzv. krček, který se dále s rostoucím napětím rozšiřuje. Napětí na mezi kluzu považujeme za horní hranici přípustného napětí při provozu součásti, neboť jejím překročením vznikají velké trvalé deformace. [39,40]

Napětí při přetržení (σ_t) je napětí, kdy dojde k porušení či přetržení zkušebního tělesa. U křehkých polymerů (amorfní termoplasty, reaktoplasty, kompozity) může být shodné s napětím na mezi pevnosti. [39,40]

Další důležitou charakteristikou materiálu je modul pružnosti (E) vyjadřující tuhost daného materiálu. Čím vyšší hodnota modulu pružnosti je, tím vyšší je jeho tuhost. Hodnota modulu pružnosti se stanovuje z deformačních křivek v oblasti, kde je patrná lineární závislost napětí (σ) na poměrném prodloužení (ϵ). Pro tuto oblast platí tzv. Hookův zákon

viz rovnice (4), který říká, že deformace je přímo úměrná napětí materiálu. Popisuje tedy pružnou deformaci materiálu působením malých sil, která po odlehčení vymizí. [39]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [MPa] \quad (4)$$

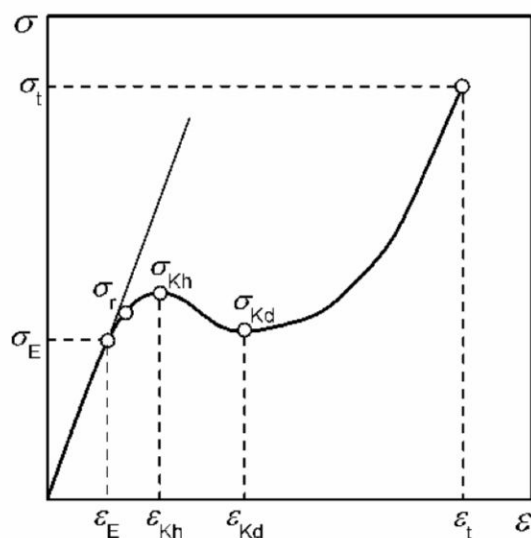
Úpravou Hookova zákona viz rovnice (4) lze vypočítat modul pružnosti. Pokud bychom jej chtěli vyjádřit graficky, jedná se o směrnici lineární části deformační křivky, resp. tangentu úhlu α . [39]

Po zatížení se zkušební těleso začíná deformovat a v důsledku toho mění své rozměry až do okamžiku rovnováhy mezi deformací a vyvozeným napětím, pokud však předtím nedojde k celkové destrukci vzorku. Prodloužením zkušebního tělesa se mění jeho původní délka a nastává délková změna, která se definuje jako poměrné (relativní) prodloužení (ε_L), viz rovnice (5). [39,40]

$$\varepsilon_L = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} [-] \quad (5)$$

Z deformačního chování lze rovněž určit tzv. Poissonův poměr (ν) viz rovnice (6), který vyjadřuje poměr příčného zúžení (ε_h) k podélnému protažení (ε_L) při deformaci polymeru. Pro nestlačitelné materiály (např. korek) je roven 0,5. U plastů je jeho hodnota daleko menší v závislost na chemickém složení a struktuře, např. pro LDPE je ν roven 0,45. [39,40]

$$\nu = \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_L} [-] \quad (6)$$



Obrázek 30 – Obecná deformační (tahová) křivka [40]

3.3 Reologie

Polymerní materiály jsou nejčastěji zpracovávány v roztaveném stavu, proto se budeme zabývat jejich tokovým chováním. Chováním polymerních tavenin během toku, tj. během deformace se zabývá reologie. Reologie je tedy věda o deformaci a toku látek. Název reologie pochází z řeckého „Panta rei“ neboli „Vše plyne“ a vyjadřuje neustálou proměnlivost materiálů v průběhu času neboli každý materiál může téci, poskytneme-li mu dostatek času. [36,41]

Reologie tedy řeší vztah mezi napětím, deformací a časem, s cílem porozumět chování polymerního materiálu v průběhu jeho zpracování a kvantifikovat reakci materiálu na tok (deformaci). K popisu tokového chování se používá reologických modelů. [41]

Newtonské kapaliny

Nejjednodušším modelem, který lze použít pro popis reologického chování během smykového namáhání, je tzv. Newtonův zákon viz rovnice (7). [41]

$$\tau_{xy} = \eta_0 \cdot \dot{\gamma}_{xy} \quad (7)$$

Kde:

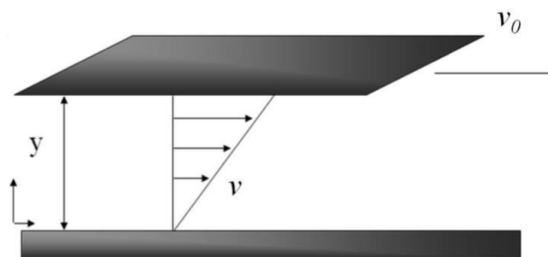
τ_{xy} – smykové napětí

$\dot{\gamma}_{xy}$ – rychlost smykové deformace

η_0 – newtonská (limitní) viskozita

Při definici Newtonova zákona vycházíme z představy polymerní taveniny mezi dvěma deskami. Dolní deska je stacionární, horní deska se pohybuje rychlostí v_0 vyvolanou smykovou silou F , která působí v rovině desky s plochou A , viz Obrázek 31. Smykové napětí je poté dáno viz rovnice (8). [41]

$$\tau = \frac{F}{A} [Pa] \quad (8)$$



Obrázek 31 – Model reologického chování během smykového namáhání [41]

Na Obrázku 31 je znázorněn popis reologického modelu, kde je zobrazena dolní vrstva, která se nepohybuje, avšak horní vrstva se vlivem působící síly posune. Relativní posunutí mezi dvěma vrstvami vyjadřuje smyková deformaci viz rovnice (9). [41]

$$\gamma = \frac{v}{y} \quad (9)$$

Rychlost smykové deformace je pak dána vztahem viz rovnice (10).

$$\dot{\gamma}_{xy} = \frac{dv_x}{dy} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (10)$$

Kde:

$\dot{\gamma}_{xy}$ – rychlost smykové deformace

Rychlost smykové deformace charakterizuje intenzitu smykového toku. [36]

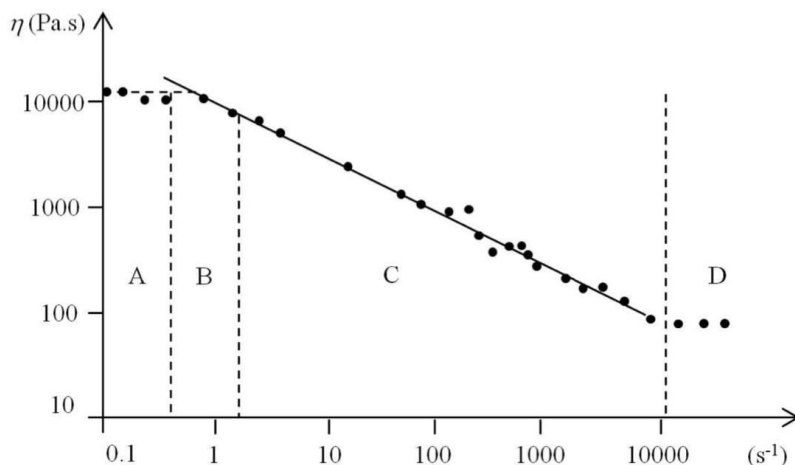
Jako další důležitá reologická veličina je viskozita. Viskozita je mírou úměrnosti mezi napětím a rychlostí smykové deformace viz rovnice (11). Viskozita udává míru odporu kapaliny vůči smykovému toku. [36,41]

$$\eta = \frac{\tau_{xy}}{\dot{\gamma}} [Pa \cdot s] \quad (11)$$

Viskozita se mění s teplotou, tlakem a závisí na molekulárních parametrech (molekulární hmotnost, distribuce molekulárních hmotností, větvení řetězců) zkoumané polymerní látky. [41]

Nenewtonské látky

Většina polymerních látek se během toku chová „newtonsky“ jen při velmi nízkých rychlostech smykové deformace. Na Obrázku 32 je tato oblast vyznačena jako *oblast A* a nazývá se tzv. první newtonské plato. Při dalším zvyšování rychlosti smykové deformace přestává být na této proměnné viskozita nezávislá, tedy buď klesá (typické chování pro polymerní taveniny) nebo stoupá, přičemž v tzv. přechodové oblasti (na Obrázku 32 *oblast B*) se směrnice závislosti mění, ale postupně se ustaluje do konstantní hodnoty, která určuje index nenewtonského chování viz Tabulka 7. Poslední oblast tokové křivky (*oblast D*) je tzv. druhé newtonské plato, které je charakterizované opětovným ustálením viskozity nezávisle na stále se zvyšující rychlosti smykové deformace (oblast vysokých rychlostí smykových deformací je obtížně měřitelná). [36,41]



Obrázek 32 – Toková křivka polymerních látek [41]

Tabulka 7 – Index Neneutonského chování [36]

Index Neneutonského chování (N)	Chování
$N = 1$	Newtonské
$N > 1$	Dilatantní
$N < 1$	Pseudoplastické

Úkolem reologie je matematicky popsat kompletní závislost zobrazenou na Obrázku 32. Je zřejmé, že *oblast A* dobře popisuje Newtonův zákon, viz rovnice (7). *Oblast C* je nejčastěji popisována tzv. mocninovým zákonem viz rovnice (12). [41]

$$\tau = m \cdot \dot{\gamma}^n \quad (12)$$

Kde:

m – konzistence [Pa · s ^{n}], vyjadřuje fluiditu materiálu (vysoké m = velká viskozita)

n – index neneutonského chování (viz Tabulka 7)

Předností mocninového zákona je jeho jednoduchost – jedná se o dvouparametrový model, přičemž oba parametry získáme z experimentálních dat. [41]

Omezením použití mocninového zákona je skutečnost, že souhlasí s experimentem jen pro určité rozmezí rychlostí smykové deformace (*oblast C*), pro nízké rychlosti smykové deformace predikuje nekonečně velkou viskozitu, nepostihuje přechodovou oblast (*oblast B*), ani oblast tzv. druhého newtonského plata. (*oblast D*). [41]

Existuje celá řada reologických modelů, které vystihují tokovou křivku v celé šíři rychlostí smykových deformací, např. Carreau model viz rovnice (13). Jde o model, který je velmi častou součástí vyhodnocovacího softwaru reologických přístrojů. [41]

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (13)$$

Kde:

$\eta_0, \eta_{\infty}, \lambda$ – materiálové parametry

K měření reologické charakteristiky polymerních tavenin ve smykovém toku se využívá: [36]

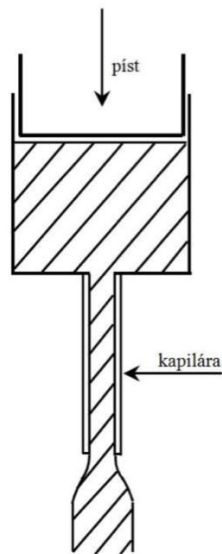
- a) Index toku taveniny (ITT, MFI – melt flow index)
- b) Toková křivka (rotační a výtlačné reometry)
- c) Skluz na stěně (výtlačné reometry)
- d) Normálová napětí N_1 (rotační reometry, výtlačné reometry – štěrbinová hlava)

K měření tokových vlastností se používají tzv. reometry. Rozlišujeme dva základní typy reometrů:

- rotační – pro měření při nízkých rychlostech smykových deformací (10^{-2} – 10^2 s⁻¹) [41]
- kapilární – pro měření v oblasti středních až vysokých rychlostí smykových deformací (10 – 10^3 s⁻¹) [41]

Nejjednodušším typem kapilárního reometru je zařízení pro měření indexu toku taveniny viz Obrázek 33 (ITT, MFI). ITT udává množství taveniny v gramech (g), které proteče kapilárou o definovaném průřezu za 10 minut při definované teplotě a zatížení dle patřičné normy. Jedná se o normovanou zkoušku zpracovatelnosti tavenin polymerních materiálů. Hodnotu ITT udává výrobce polymerních materiálů v materiálovém listu. Z definice ITT je zřejmé, že představuje pouze jeden bod na tokové křivce, slouží proto jen k rychlé

orientaci v tokových vlastnostech materiálů. Rychlost smykové deformace a smykové napětí lze pro newtonské materiály vyjádřit ve vztahu viz rovnice (14). [41]



Obrázek 33 – Schéma kapilárního reometru [41]

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = \frac{4 \cdot \dot{Q}}{\pi \cdot R^3} \quad (14)$$

$$\tau = \frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot L} \quad (15)$$

Kde:

Δp – tlakový spád v kapiláře

\dot{Q} – objemový průtok v kapiláře

L – délka kapiláry

R – poloměr kapiláry

Pro newtonské látky získáme použitím těchto rovnic pouze zdánlivé hodnoty rychlosti smykové deformaci i smykového napětí, pro výpočet skutečných hodnot je nutné vztahy korigovat. [41]

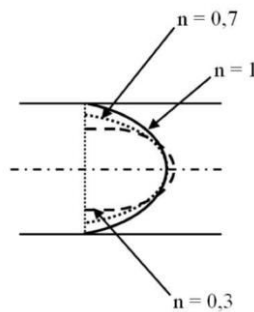
Nejčastěji používaná korekce smykového napětí je **Bagleyho korekce** – korekce na koncové jevy v kapiláře, která upravuje vztah pro výpočet skutečného korigovaného smykového napětí viz rovnice (16). [36,41]

$$\tau_c = \frac{\Delta p_{cap} \cdot R}{2 \cdot L} \quad (16)$$

$$\Delta p_{cap} = \Delta p - \Delta p_{end} \quad (17)$$

Rabinowitschova korekce – korekce na neneutonské chování, tedy představuje zahrnutí odchylky od ideálního newtonského tvaru tokového profilu kapilárou viz Obrázek 34. Pro pseudoplastické látky je tedy skutečná (korigovaná) rychlost smykové deformace menší než zdánlivá a zjišťujeme ji pomocí vztahu viz rovnice (18). [36,41]

$$\dot{\gamma}_c = \dot{\gamma}_A \cdot \left(\frac{3 \cdot N + 1}{4 \cdot N} \right) \quad (18)$$



Obrázek 34 – Rychlostní profily polymerních tavenin [41]

3.4 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR)

Infračervená (IR) spektroskopie je analytická nedestruktivní technika, která je především určena k identifikaci a strukturní charakterizaci typických vazeb v dané organické sloučenině. Tato technika měří pohlcení neboli absorpci infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem. Infračerveným zářením je elektromagnetické záření v rozsahu vlnových délek 0,78 mm až 1000 mm, což odpovídá rozsahu vlnočtů 12800 cm^{-1} až 10 cm^{-1} . [42, 43]

Celá oblast je rozdělena na oblast blízkou (12800 cm^{-1} až 4000 cm^{-1}), oblast střední (4000 cm^{-1} až 200 cm^{-1}) a vzdálenou infračervenou oblast (200 cm^{-1} až 10 cm^{-1}). Nejpoužívanější oblastí je však střední oblast. [42, 43]

Principem metody je absorpce IR záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v jednotkách absorbance (A) na vlnové délce dopadajícího záření. [42, 43]

Absorpční pásy, které mají vrcholy v intervalu 4000 cm^{-1} až 1500 cm^{-1} jsou vhodné pro identifikaci funkčních skupin (např. C=O, N-H, CH₃ aj.). Pásy v oblasti 1500 cm^{-1} až 400 cm^{-1} jsou nazývané jako oblasti „otisku palce“. Pomocí digitalizovaných knihoven infračervených spekter je možno identifikovat neznámou analyzovanou látku. [43]

Výběr techniky a příprava vzorků

a) Kapalně vzorky

- nejjednodušší cesta je měření vzorku v kyvetě o určité tloušťce mající okénka KBr (bromid draselný) nebo NaCl (chlorid sodný) [43]
- pokud je kapalně vzorek nerozpustný v rozpouštědlech (chloroform CHCl₃, tetrachlormetan CCl₄), může být ve velmi malém množství měřen transmittančně ve formě kapilární vrstvy mezi dvěma KBr (NaCl) okénky [43]
- v poslední době se velmi často uplatňuje technika zeslabené úplné reflektance (ATR) [43]

b) Pevné vzorky

- vzorky rozpustné v rozpouštědlech (CHCl_3 , CCl_4) jsou měřeny v běžných kyvetách určených pro kapalné vzorky [43]
- je možné připravit tenký film vzorku rozpuštěním v určitém rozpouštědle, které necháme odpařit a poté můžeme změřit IR spektrum vzorku [43]
- pevné vzorky bývají mlety v malém vibračním mlýnku s KBr, tento vzniklý homogenní prášek je poté slisován do tenké tablety, která je analyzována [43]
- tzv. nujolová technika, ve které je práškový vzorek homogenizován s malým množstvím parafinového oleje a výsledná suspenze je měřena mezi KBr (NaCl) okénky ve formě tenké vrstvy [43]

Pro měření absorpčních spekter je např. využíván spektrometr Nicolet Avatar 320 FT-IR spolu s PC viz Obrázek 35, který obsahuje software s digitalizovanými IR spektry, sloužící k identifikaci neznámé látky.



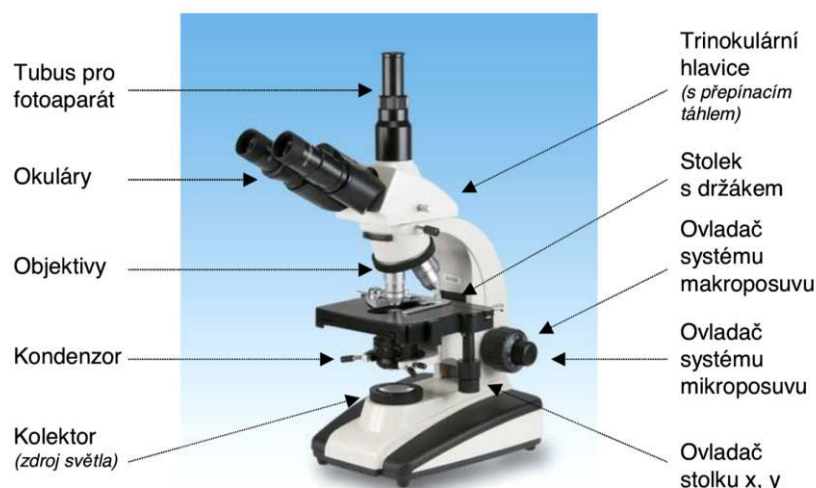
Obrázek 35 – Spektrometr Nicolet Avatar 320 FT-IR [44]

3.5 Mikroskopie

Optická (světelná) mikroskopie je jednoduchá zobrazovací metoda, která nachází široké uplatnění v průmyslových či výzkumných laboratořích právě pro svou relativní nenáročnost na přístrojové vybavení a snadné ovládání. Mikroskopie slouží pro zobrazení, ale hlavně zvětšení širokého spektra barevných i nebarevných materiálů (rostlinné a živočišné buňky, horniny, polymery atd.). Pro zkoumání předmětů se využívá elektromagnetické záření z oblasti 400–750 nm (viditelná oblast světla). Při zkoumání daného předmětu dochází ke změně charakteristik používaného záření jako je amplituda, fáze, polarizace a frekvence. [45]

Optická mikroskopie umožňuje rozeznat struktury, které nejsou viditelné pouhým okem. Skládá se z osvětlovací části (zdroj světla, kondenzor, clona), mechanické části (monokulár či binokulár). Klasické mikroskopy mají objektivy nad vzorkem. Světelný mikroskop umožňuje zvětšit obraz vzorku až tisíckrát a rozlišovat detaily až na úrovni $0,2 \mu\text{m}$. Toto omezení je dáno vlnovou povahou světla, tedy ani v případě použití větších či kvalitnějších čoček se rozlišovací schopnost nezlepší. [45]

Pro kvalitní zobrazení preparátu je zapotřebí, aby jím procházelo světlo, které se dále soustředí na vzorek pomocí kondenzoru a při použití vhodné kombinace čoček se obraz zaostřuje na úroveň oka. Objektiv je tvořen soustavou čoček s velmi krátkou ohniskovou vzdáleností, která vytváří skutečný, převrácený a zvětšený obraz objektu, který se promítá mezi ohnisko okuláru a okulár. Okulárem je pak tento obraz pozorován zdánlivě zvětšený. Ostrost a kvalita pozorovaného obrazu závisí na kvalitě používaných optických soustav. Výsledný obraz je tedy zvětšený, převrácený a zdánlivý. [45]



Obrázek 36 – Biologický mikroskop [46]

3.6 Dynamická mechanická analýza (DMA)

Dynamická mechanická analýza (DMA) je jedna z nejcitlivějších technik, která je schopna charakterizovat a interpretovat mechanické chování materiálu. Podstata metody DMA spočívá ve sledování viskoelastické odezvy materiálu podrobené malému oscilačnímu napětí, tedy přístroj aplikuje na materiál cyklické napětí a měří deformační odezvu materiálu nebo naopak. Metoda odděluje viskoelastickou odezvu materiálu na dvě komponenty modulu (E^*) a to reálnou část, která reprezentuje elastický (dynamický) modul (E') a imaginární část, která představuje útlumovou nebo viskozitní (ztrátovou) složku (E''). Celkový tzv. komplexní modul se vyjadřuje dle rovnice (19).

$$E^* = E' + iE'' \quad (19)$$

Tato separace měření do dvou komponent popisuje dva nezávislé procesy uvnitř materiálu, a to elasticitu (vratná složka) a viskozitu (ztrátová, disipační energie). To je základní princip DMA, který ji charakterizuje na rozdíl od ostatních metod testování mechanických vlastností látek. [47,48]

Základem přístroje jsou dvě vyvážená rovnoběžná ramena, která jsou uložena na speciálních čepech, umístěných blízko středu ramen. Čepy jsou vysoce přesné torzní pružiny. Mezi rovnoběžná ramena se do speciálního držáku upíná vzorek, který vytváří rezonanční systém. Rezonančním systémem je myšlena rezonanční frekvence, která je závislá na modulu a geometrii vzorku. [47]

Celé zařízení je umístěno v termostatovaném prostředí, což umožňuje izotermní měření, ale i měření při změně teploty, obvykle od $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzorky lze namáhat v tahu, tlaku, smyku či dvoubodovém a třibodovém ohybu. Deformace vzorku je způsobena dvěma protichůdnými momenty stejné velikosti, které působí na protilehlé konce vzorku upnutého do svorek. [47,48]

K určení průběhu modulu a ztrátového činitele $\tan \delta$ je možno aplikovat dvě různé metody. První metoda je založena na přímém určení modulu z amplitudy kladné a záporné půlvlny síly a deformace. Druhá metoda je založena na zcela odlišném principu, kdy se data zpracují pomocí Fourierovi transformace a výsledkem je průběh modulu a ztrátového úhlu v závislosti na teplotě nebo čase pro každou harmonickou složku. [47]

Pomocí DMA lze charakterizovat polymerní materiál závislostí modulu a útlumu neboli ztrátového úhlu na teplotě, popřípadě na čase. Tím metoda poskytuje základní údaje o mechanických vlastnostech, které mají přímý vztah ke zpracování, a především ke zpracovatelnosti a použitelnosti výrobku. [47]

Metodu DMA lze použít k určení:

- teploty skelného přechodu, teploty měknutí a tání [48]
- mechanických ztrát v materiálu (charakterizuje jeho tlumící schopnost) [48]
- stupně krystalizace, míra orientace, bod zesílení [47]
- dlouhodobou teplotní stabilitu (stárnutí materiálu) [47]

Standartní měřicí uspořádání:

- měření v tlaku, tahu a smyku v sendvičovém uspořádání [47]
- dvojitý vetknutý nosník, jednoduše vetknutý nosík, třibodový ohyb [47]



Obrázek 37 – Přístroj DMA [49]

3.7 Propustnost pro plyny

Člověk využívá bariérové vlastnosti polymerů zejména v obalovém průmyslu. Propustnost obalových materiálů (obalových fólií, membrán, filmů a nádob) musí být přizpůsobena citlivosti zabaleného obsahu na prostupující látku a specifické vlastnosti. Některé balíčky musí být téměř hermeticky uzavřené, zatímco jiné mohou a někdy i musí být selektivně propustné. [50]

Průchod malých molekul pevnými materiály se nazývá permeace. Malá molekula procházející pevnou látkou se nazývá permeant. Vlastnosti propustnosti jsou důležité v mnoha aplikacích a setkáváme se s aplikacemi v každodenním životě. Znalosti o přesné míře permeace jsou proto nezbytné. [50]

Obecně lze průchod plynu přes polymerní materiál rozdělit do tří kroků:

- absorpce plynu (dle chemické afinity nebo rozpustnosti) v materiálu [51]
- prostupem plynu (difuzí skrz tento materiál) [51]
- desorpcí plynu (na straně s menším potenciálem) [51]

Každý z výše jmenovaných kroků může sehrát při vlivu na konečnou plynopropustnost svou roli. Příkladem poklesu prostupu plynu by mohlo být snížení volného objemu polymeru, či omezení pohyblivosti řetězců. [51]

Představme si polymerní membránu s tloušťkou l a plochou A , přes kterou prochází tok látky (plynu). Označíme-li celkové množství prošlé látky za čas t jako hodnotu Q , lze vyjádřit jednotkový prostup plynu (jednotkovou plochou za jednotku času) dle rovnice (20). [51]

$$J = \frac{Q}{A \cdot t} \left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \text{s}} \right] \quad (20)$$

Kde:

J – tok difuzní látky podle prvního Fickova zákona

V praxi může být obtížné měřit či jinak zjistit koncentraci plynu, jenž se nachází na obou stranách membrány. Tento problém lze vyřešit zavedením sorpčního koeficientu S , který udává míru rozpustnosti daného plynu v materiálu v závislosti na tlaku. Pokud je závislost mezi koncentrací c a tlakem p lineární, lze psát rovnici (21). [51]

$$c = S \cdot p \quad (21)$$

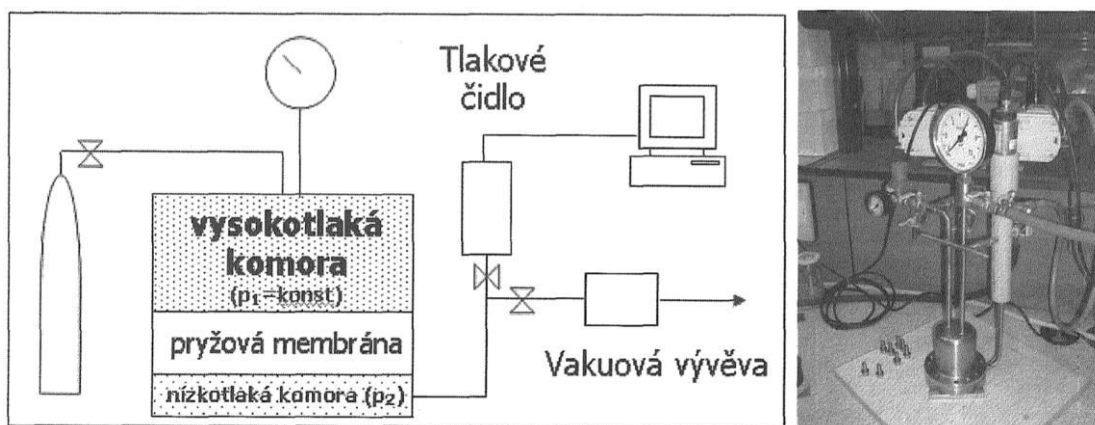
Spojením rovnic (20) a (21) dostaneme vztah definující průtok plynu přes membránu o jednotkové ploše A , šířce l , za jednotkový čas t , v závislosti na tlakovém gradientu viz rovnice (22).

$$J_x = \frac{DS \cdot (p_1 - p_2)}{l} \quad (22)$$

Spojením rovnic (20) a (21) pro konkrétní membránu s plochou A , čas t a množství prošlého plynu Q lze permeační koeficient vyjádřit rovnicí (23).

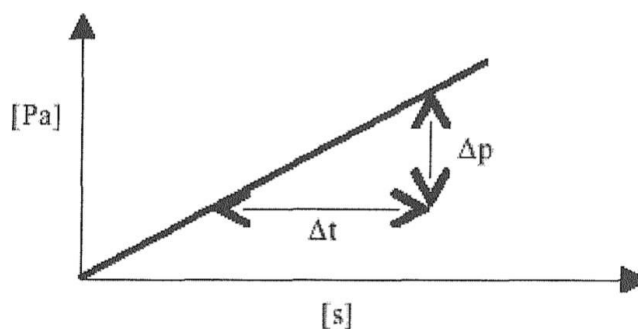
$$P_e = \frac{Q \cdot l}{t \cdot A \cdot (p_1 - p_2)} \quad [\text{mol}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}] \quad (23)$$

Měření plynopropustnosti metodou konstantního objemu je výhodné zejména z hlediska technické a metodické nenáročnosti. Zařízení bylo zkonstruováno na Ústavu inženýrství polymerů na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně na základě normy ČSN 6400115 viz Obrázek 38. [51]



Obrázek 38 – Schéma měřicího zařízení metodou konstantního objemu [51]

Principem měření je tedy elektronický záznam nárůstu tlaku plynu (za ustáleného stavu) v nízkotlaké komoře v závislosti na čase. Jinými slovy řečeno, záznam směrnice přímky $k = \Delta p / \Delta t$ způsobem, jakým je znázorněno na Obrázku 39. [51]



Obrázek 39 – Nárůst plynu v nízkotlaké komoře [51]

Hodnoty tlaku jsou tlakovým čidlem zaznamenávány do určeného PC. Následně je ze směrnice nárůstu tlaku v nízkotlaké komoře vypočten permeační koeficient. Je využito vztahu viz rovnice (24), která vznikne kombinací rovnice (23) a stavové rovnice plynu ($pV = nRT$). [51]

$$P_e = \frac{\Delta p}{\Delta t} \frac{V_0 \cdot l}{R \cdot T \cdot A \cdot (p_1 - p_0)} \quad [\text{mol/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}] \quad (24)$$

Kde:

P_e – permeační koeficient [$\text{mol/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$]

$\Delta p/\Delta t^*$ - nárůst tlaku v nízkotlaké části [$\Delta \text{Pa}/\Delta \text{s}$]

l^{**} - tloušťka membrány [m]

$(p_1 - p_0)$ – tlakový gradient [Pa]

T^{**} - teplota [K]

V_0^{***} - objem nízkotlaké komory [m^3]

S^{***} - plocha membrány [m^2]

R – plynová konstanta [$\text{J/K} \cdot \text{mol}$]

(* - elektronicky snímaná hodnota, ** - volitelné parametry měření, v průběhu měření jsou konstantní, *** - veličiny jsou považovány za konstanty, vycházející z konstrukce stroje)

Jestliže je tedy nárůst tlaku v nízkotlaké komoře nulový ($\Delta p/\Delta t = 0$), membrána se chová jako dokonale nepropustný materiál. Výsledný permeační koeficient tedy bude roven nule ($P_e = 0$). V jakémkoliv jiném případě bude zaznamenáván nárůst tlaku (platí-li $p_1 > p_2$), jemuž bude odpovídat příslušná hodnota permeačního koeficientu v závislosti na teplotě měření a druhu plynu. [51]

Můžeme tedy říci, že určení plynopropustnosti metodou konstantního objemu je velmi jednoduchou, přesnou a reprodukovatelnou metodou pro měření bariérových vlastností polymerních směsí. Konstrukce zařízení je univerzální a dovoluje měřit i rozdílné druhy plynů. [51]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Cílem této práce bylo připravit vzorky materiálů, které byly z odpadních, ale i původních surovin a zjistit, jak je daný materiál ovlivňován přidavkem odpadního tetrapaku. Jako vstupní surovina pro výrobu vzorků byl použit odpadní polyethylen od společnosti SUEZ a.s., dále neupravený polyethylen Dowlex 2631.10UE a plazmově upravený polyethylen Dowlex 2631.10UE od společnosti Dow Chemical Company. Jako zástupce z řad polypropylenu byl zvolen odpadní polypropylen z automobilového průmyslu, který obsahoval 16 hmotnostních % skelných vláken. Pro splnění tohoto cíle byly vytvořeny jednotlivé kroky, a to:

1. Příprava tetrapaku

Odpadní tetrapak byl vytvořen ve spolupráci s firmou Plastikářský klastr z. s. (Plastr) se sídlem ve Zlíně. Na výrobu kompaundu, skládající se z polyethylenu a hliníku byla použita kompaundační planetární linka a bylo odzkoušeno zakomponování drceného hliníku do polyethylenu.

2. Příprava vzorků

Vstupní materiály pro výrobu vzorků byly smíchány v poměrech 70:30, 60:40 a 50:50 s předpřipraveným tetrapakem pomocí plastikářského laboratorního hnětiče Brabender. Vzniklé struny byly chlazeny pomocí chladicí vody, následně granulovány pomocí odtahovacího granulárního zařízení Brabender a vzniklý granulát byl následně sušen při pokojové teplotě. Následně byly lisovány desky o tloušťce 1 mm a 2 mm.

3. Vliv modifikace na vlastnosti

Výsledné vlastnosti byly následně testovány pomocí univerzálního zkušebního stroje ZWICK 1456, kde byla provedena tahová zkouška. Následně byla měřena reologie na kapilárním reometru Göttfert RG20, mikroskopie pomocí optického mikroskopu, FTIR pomocí Nicolet Avatar 320 FT-IR, dynamická mechanická analýza pomocí přístroje DMA od společnosti Mettler Toledo a na závěr byla měřena propustnost pro plyny.

5 PŘÍPRAVA TETRAPAKU

Výroba vzorku proběhla ve spolupráci s firmou Plastikářský klastr z. s. (Plastr) se sídlem ve Zlíně. Jako výrobní stroj byl zvolen stroj Platex Planetary Extruder viz Obrázek 40 při teplotě horní desky 180 °C, teplotě spodní desky 180 °C a otáčkách šneku 32 až 34 otáček za minutu. Jako zpracovávaný materiál byl zvolen odpadní tetrapak, který se skládal z rozdrčených víček a bariérových vrstev aseptického obalu, tedy hliníku a polyethylenu viz Obrázek 41.



Obrázek 40 – Platex Planetary Extruder [52]



Obrázek 41 – Odpadní tetrapak [52]

Z důvodu nadýchanosti směsi bylo nejlepší řešení přidávání tetrapaku v menších dávkách do násypky výrobního stroje. Nedochovalo k ulpívání materiálu v násypce a extrudér byl neustále zásobován materiálem. Chlazení vytlačovaného materiálu probíhalo na vzduchu při pokojové teplotě viz Obrázek 42.



Obrázek 42 – Chlazení vyrobeného materiálu [52]

Poté co proběhlo ochlazení materiálu na pokojovou teplotu byl materiál rozdrcen pomocí nožového mlýnu Moretto viz Obrázek 43, který obsahoval síto s velikostí ok 5 mm.



Obrázek 43 – Nožový mlýn Moretto [52]

6 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Na přípravě vzorků se podílela firma SUEZ a.s., kde byl připraven odpadní polyetylen a firma SurfaceTreat a.s., která plazmově modifikovala polyetylen Dowlex 2631.10UE od společnosti Dow Chemical Company. Vzniklé směsi byly připraveny na plastikářském laboratorním hnětiči Brabender na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně, konkrétně na fakultě technologické.

6.1 Příprava odpadního polyethylenu

Odpadní PE je směsný granulát získaný na provozní lince firmy SUEZ a.s. v provozovně v Náměšti na Hané. Vstupní materiál je částečně čistý sesbíraný odpad z obalů PE různých typů s možnou příměsí PP a PE/EVA, kdy zdrojem jsou hlavně velké obchody a prodejny. Postup recyklace je víceméně stejný, jako je popsáno v úvodu práce na recyklační lince s následnou granulací za horka. Výsledkem jsou granule ve tvaru „čočky“ viz Obrázek 44 s různými odstíny od zelenošedé přes hnědozelenou až hnědou barvu s ITT cca 2 g za 10 minut, tedy vytlačovací typ.



Obrázek 44 – Odpadní PE ve tvaru „čočky“ [52]

6.2 Příprava plazmově upraveného polyethylenu Dowlex 2631.10UE

Plazmovou úpravu materiálu Dowlex 2631.10UE od společnosti Dow Chemical Company provedla firma SurfaceTreat a.s. se sídlem v Českých Budějovicích.

Metoda modifikace práškových materiálů je postavena na tepelné aktivaci povrchu částic buď v pecích, nebo na přímém plamenu. Kontinuální modifikace je však možné provádět pouze plamenem. Obě metody jsou pro polymery značně omezeny tepelnou degradací modifikovaného materiálu. Problematika modifikace tepelně citlivých materiálů, jako jsou právě polymery, je však řešena pomocí studených plazmových výbojů. [53]

Pomocí plazmových výbojů lze rovněž zbavovat povrch různých nečistot, jako jsou např. tuky, mastné kyseliny nebo bakterie. K čištění povrchu dochází jeho „bombardováním“ aktivními ionty a následně dochází k odsátí nečistot. Tato modifikace se provádí zejména před následným lepením či finálními úpravami, jako např. lakování, potisk a jiné. [53]

K úpravě povrchu materiálů je využíváno patentované zařízení pro nízkotlakou plazmovou úpravu. Toto zařízení nám umožňuje buď modifikaci práškových materiálů a granulátů, nebo modifikaci povrchu fólií či plastových dílů. Mezi hlavní přednosti tohoto zařízení patří maximální oblast kontaktu ošetřovaného materiálu s plazmou (zajištěno ošetření velké povrchové plochy všech částic práškového materiálu, při jeho současném promíchávání), variabilita procesu (procesní plyn, tlak, délka) vzhledem k typu modifikace a druhu materiálu, široká škála zpracovávaných sypkých materiálů (granuláty v mm průměru, prášek v μm průměru). [53]

Podstatou plazmových procesů spočívá ve vytváření aktivních částic (ionty, excitované atomy, radikály apod.) průchodem plynu plazmovým výbojem. Tyto částice mohou například vytvářet vrstvy, vyvolávat chemické reakce nebo se jich aktivně účastnit. V našem případě aktivní částice pracovního plynu vzniklé ve výboji způsobují reakci na povrchu polymeru, kde právě dochází k navázání nových funkčních skupin na jeho řetězec, zejména OH skupin. Mění se tedy chemická struktura povrchu částic z nepolární na polární a hydrofobní materiál se stává hydrofilní. Výsledným efektem je tedy požadovaná změna

povrchové energie projevující se např. zvýšením smáčivosti a disperze materiálu či zvýšením adhezních vlastností polymerů k jiným materiálům.

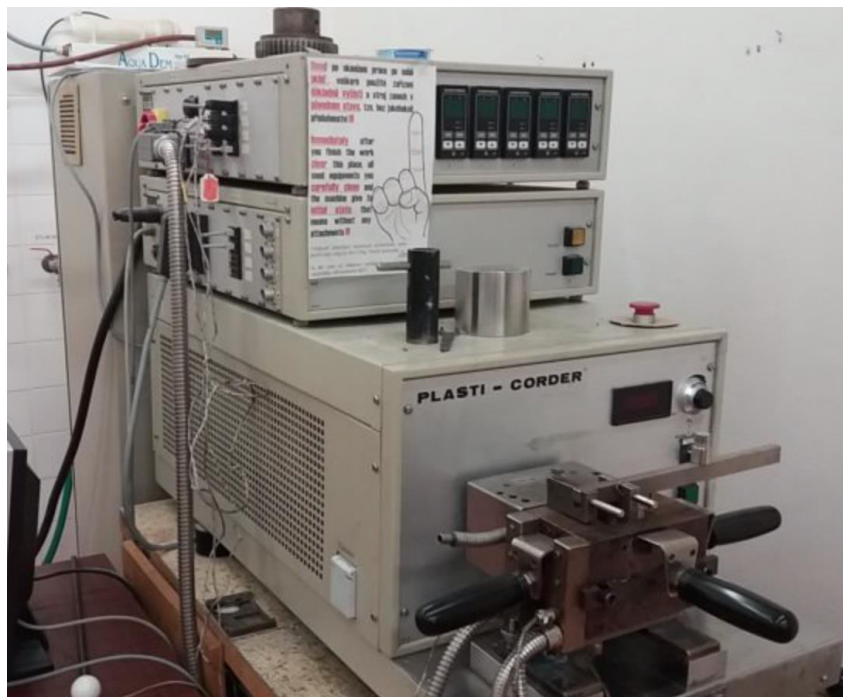
Porovnání smáčivosti plazmově upraveného a neupraveného PE prášku v destilované vodě vidíme na Obrázku 45. [53]



Obrázek 45 – Porovnání smáčivosti PE prášku [53]

6.3 Příprava směsí

Příprava směsí byla provedena pomocí plastikářského laboratorního hnětiče Brabender viz Obrázek 46. Zpracovatelské teploty byly nastaveny pro PE 160 °C a pro PP 210 °C.



Obrázek 46 – Plastikářský laboratorní hnětič Brabender [54]

Byly vytvořeny směsi odpadního PE od společnosti SUEZ a.s. a odpadního tetrapaku v poměrech 70:30, 60:40 a 50:50, kdy směs 70:30 obsahovala nejmenší množství odpadního tetrapaku a v dalších směsích byl postupně obsah odpadního tetrapaku navyšován. Vzniklá směs „čoček“ a granulí odpadního tetrapaku byla důkladně promíchána v PE sáčku a následně nasypána do násypky hnětiče. Proces vytlačování probíhal stabilně, bez větších problémů.

Dále byly připraveny směsi neupraveného PE Dowlex 2631.10UE s odpadním tetrapakem a plazmově upraveného PE Dowlex 2631.10UE s odpadním tetrapakem ve stejných poměrech 70:30, 60:40 a 50:50. Taktéž došlo k promíchání směsi v PE sáčku a směs práškového PE a granulovaného tetrapaku byla následně postupně nasypána do násypky hnětiče. U směsi obsahující neupravený PE a odpadní tetrapak bylo vidět menší zlepšení procesu vytlačování, neboť tato směs sestávala z čistého práškového PE. Avšak zlepšení procesu vytlačování nastalo ve větší míře u směsi obsahující upravený PE a odpadní

tetrapak. Nedochovalo k přetrhávání struny a vznikala soudržná struna téměř stejného průměru, která se následně dobře granulovala.

Jako poslední směs byla připravena směs odpadního PP obsahující 16 hmot. % skelných vláken s odpadním tetrapakem, rovněž ve stejných poměrech, tedy 70:30, 60:40 a 50:50. Promíchání vzniklé směsi bylo provedeno rovněž v PE sáčku a následně byla směs nasypána do násypky. Při vytlačování všech směsí odpadního PP s obsahem skelných vláken a odpadního tetrapaku docházelo k velkému navlhání a absorbování vody. Povrch vzniklé struny byl na dotyk hrubý. Při granulaci vzniklých strun byla část vody odstraněna a po granulaci byly všechny směsi sušeny při laboratorní teplotě.

Všechny vzniklé struny vytlačovaných směsí byly chlazeny pomocí vodní lázně a následně ručně odtahovány. Granulování vzniklých strun probíhalo pomocí granulačního zařízení Brabender a bylo provedeno později, neboť bylo obtížné seřídit rychlost granulačního zařízení s rychlostí vytlačování.

Lisování vzorků

Lisování vzorků probíhalo pomocí ručního laboratorního lisu viz Obrázek 47 a chlazení vzorků probíhalo v hydraulickém laboratorním lisu viz Obrázek 48. Pro lisování byl zvolen rámeček o velikosti 125 mm x 125 mm, tloušťka rámečku dle potřeby (1 mm či 2 mm). Teplota pro lisování PE byla 165 °C a jako ochranná fólie sloužila při lisování PET fólie. Teplota pro lisování PP byla 220 °C a zde již ochranná PET fólie by neplnila svoji funkci, tudíž jako ochranná fólie zde posloužil alobal nebo teflonové čtverce. Lisování probíhalo 7 minut a chlazení v lisu taktéž 7 minut. Všechny vylisované vzorky byly tříděny dle koncentrací a druhu do předem popsanych uzavíratelných sáčků.

Dále byly pomocí lisování vyrobeny vzorky pro plynopropustnost, kdy byl materiál nasypán mezi ochranné fólie a bez rámečku vložen do lisu. Vznikla tenká fólie, která byla po vychlazení zbavena přetoků a uložena do předem popsanych uzavíratelných sáčků. Pro lisování PE byly využity PET fólie, teplota 165 °C a čas lisování se pohyboval okolo 5 minut, doba chlazení rovněž 5 minut. Pro lisování PP byly využity teflonové fólie, teplota 220 °C a lisování probíhalo 5 minut, chlazení rovněž 5 minut.



Obrázek 47 – Ruční laboratorní lis [52]



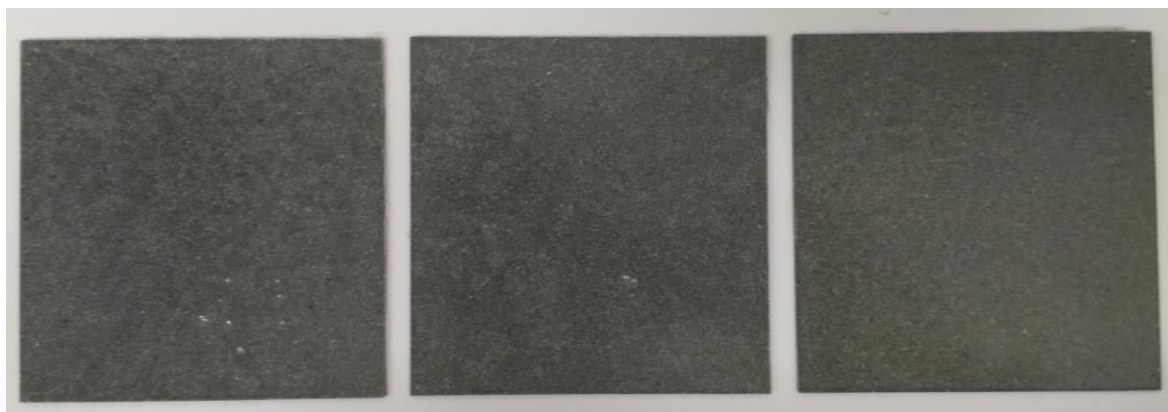
Obrázek 48 – Hydraulický laboratorní lis [52]

Na Obrázku 49 vidíme vylisované vzorky odpadního PE a odpadního tetrapaku, vlevo koncentrace 70:30, uprostřed 60:40, vpravo 50:50. Vidíme, že u koncentrace 50:50 je patrnější tmavá barva oproti koncentraci 70:30, zbarvení je způsobeno větší koncentrací odpadního tetrapaku (hliníku). Toto zbarvení bylo vidět i u granulátů.



Obrázek 49 – Odpadní PE s odpadním tetrapakem [52]

Na Obrázku 50 vidíme vylisované vzorky neupraveného PE Dowlex a na Obrázku 51 vidíme vzorky upraveného PE Dowlex. Koncentrace vlevo 70:30, uprostřed 60:40, vpravo 50:50. Na první pohled si můžeme všimnout, že modifikovaný PE vypadá více homogenní. Oproti neupravenému PE má upravený PE méně bílých shluklých míst, tedy se můžeme domnívat, že s odpadním tetrapakem lépe kooperuje.



Obrázek 50 – Neupravený PE Dowlex s odpadním tetrapakem [52]



Obrázek 51 – Upravený PE Dowlex s odpadním tetrapakem [52]

Jako poslední materiál byl lisován odpadní PP obsahující 16 hmotnostních % skelných vláken s odpadním tetrapakem viz Obrázek 52. Koncentrace vlevo 70:30, uprostřed 60:40, vpravo 50:50. Povrchové defekty a matnost vylisovaných desek je dána použitou ochrannou fólií, v tomto případě alobalem. Mírné defekty vylisované desky jsou dány přítomnou vlhkostí v materiálu, kterou se nepodařilo zcela odstranit.



Obrázek 52 – Odpadní PP obsahující skelná vlákna s odpadním tetrapakem [52]

Z vylisovaných desek byly vysekány pomocí hydraulického ramenového sekacího stroje Svit tělíska tvaru 5A viz Obrázek 29.

7 VLIV MODIFIKACE NA VLASTNOSTI

U všech směsí byly provedeny zkoušky vlivu modifikace na vlastnosti s cílem zjistit, jak odpadní tetrapak ovlivňuje mechanické a reologické vlastnosti. Byla provedena tahová zkouška na univerzálním stroji ZWICK 1456, měření reologických vlastností na kapilárním reometru Göttfert RG20. Jako další metody byly provedeny metoda infračervené spektroskopie (FTIR), mikroskopie, dynamická mechanická analýza (DMA) a měření plynopropustnosti.

7.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na univerzálním zkušebním stroji ZWICK 1456. Jako zkušební tělíska byly zvoleny tělíska typu 5A viz Obrázek 29. Nastavení zkušebního stroje bylo zvoleno pro všechny materiály stejné a měření bylo provedeno za účasti extenzometru.

7.1.1 Odpadní polyethylen

Tabulka 8 – Pevnost v tahu a modul pružnosti odpadního PE a odpadního tetrapaku

	σ_m [MPa]	E [MPa]
Čistý PE	9,9	157,5
PE+T 70:30	6,2	223,3
PE+T 60:40	6,9	287,7
PE+T 50:50	9,7	418,5

Z Tabulky 8 je patrné, že s rostoucím obsahem odpadního tetrapaku roste pevnost v tahu, kdy směs obsahující 30 hmot. % odpadního tetrapaku dosahuje 6,2 MPa, avšak směs obsahující 50 hmot. % odpadního tetrapaku dosahuje 9,7 MPa. Dochází rovněž i k nárůstu modulu pružnosti, kdy u směsi obsahující 30 hmot. % odpadního tetrapaku je modul pružnosti 223,3 MPa, avšak u směsi obsahující 50 hmot. % odpadního tetrapaku je modul pružnosti 418,5 MPa. Jde téměř o dvojnásobný modul pružnosti než u směsi obsahující 30 hmot. % odpadního tetrapaku.

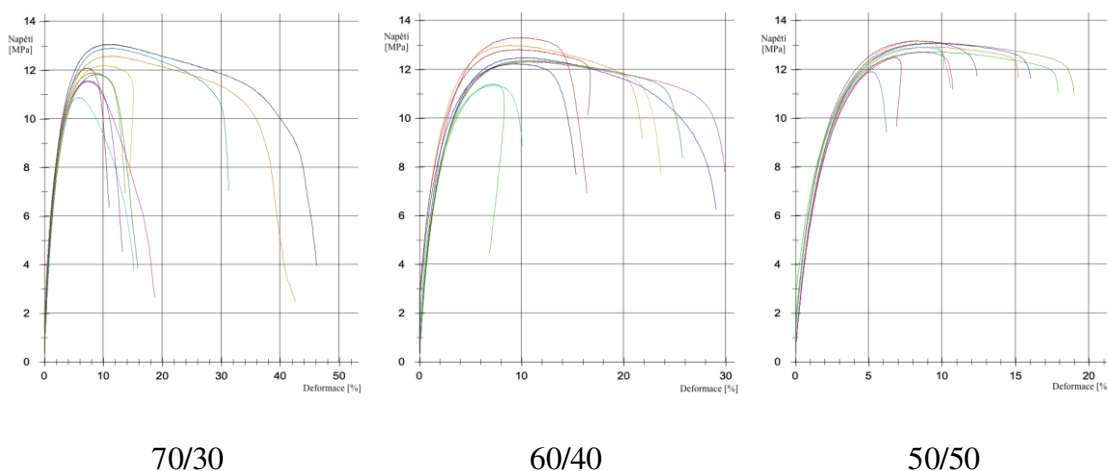
7.1.3 Plazmově upravený polyethylen Dowlex 2631.10UE

Tabulka 10 – Pevnost v tahu a modul pružnosti mPE Dowlex a odpadního tetrapaku

	σ_m [MPa]	E [MPa]
Čistý mPE Dowlex	15,3	399,7
MDOW+T 70:30	12,1	544,7
MDOW+T 60:40	12,4	529,8
MDOW+T 50:50	12,8	625,8

V Tabulce 10 vidíme, že modifikace plazmově upraveného PE Dowlex odpadním tetrapakem nám s rostoucím obsahem odpadního tetrapaku zlepšuje vlastnosti. Došlo ke zvýšení pevnosti v tahu, kdy u směsi obsahující 30 hmot. % odpadního tetrapaku byla naměřena pevnost v tahu 12,1 MPa, avšak u směsi obsahující 50 hmot. % odpadního tetrapaku byla naměřena pevnost v tahu 12,8 MPa. Obdobně došlo k nárůstu modulu pružnosti, kdy u směsi obsahující 30 hmot. % odpadního tetrapaku byl naměřen modul pružnosti 544,7 MPa, kdežto u směsi obsahující 50 hmot. % odpadního tetrapaku byl naměřen modul pružnosti 625,8 MPa.

Při srovnání neupraveného PE Dowlex a plazmově upraveného PE Dowlex docházíme k závěru, že tato úprava nám nepatrně zvýšila pevnost v tahu z 14,8 MPa na 15,3 MPa, avšak dochází ke zhoršení modulu pružnosti z 408,4 MPa na hodnotu 399,7 MPa.



Obrázek 55 – Průběh tahové zkoušky mPE Dowlex a odpadního tetrapaku

7.2 Reologie

Měření reologických vlastností probíhalo na kapilárním reometru Göttfert RG20. Cílem bylo zjistit reologické chování vzniklých odpadních materiálů s cílem zjistit index toku taveniny. Prvotním předpokladem bylo, že připravené plnivo, v našem případě odpadní tetrapak, který je obsažen ve studovaných materiálech, bude bránit materiálu v tečení a dochází tedy k nárůstu viskozity materiálu. Jelikož hliník jakožto velmi lehký kov šedé barvy má teplotu tání okolo 660 °C, je zřejmé, že při teplotě zpracování použitých polymerních materiálů se hliník nachází pořád v pevném skupenství a je unášen při tečení polymerním materiálem.

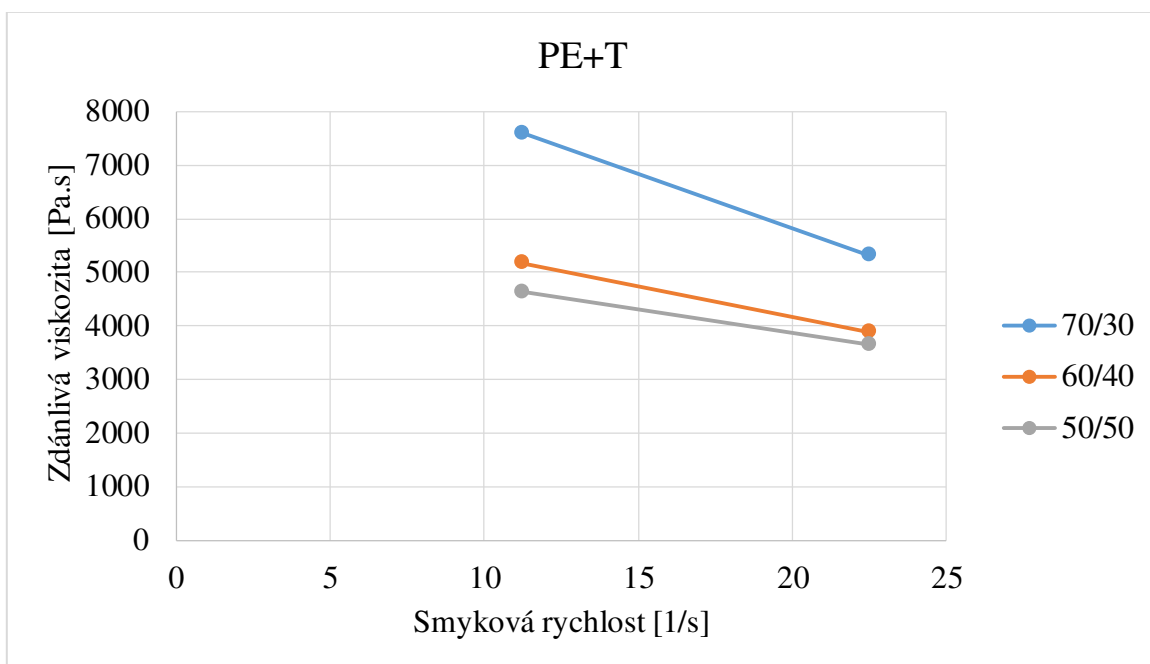
Nastavení reometru Göttfert RG20

Pro všechny vytvořené směsi byla zvolena stejná metoda měření, kdy posun pístu byl 0,05 mm/s a 0,1 mm/s. Z počátku měření byla tedy rychlost posunu pístu 0,05 mm/s, po naměření konstantní hodnoty byl posun pístu programem upraven na rychlost 0,1 mm/s. Po ukončení měření program vyhodnotil výsledky a vytvořil zápis do tabulky.

7.2.1 Odpadní polyethylen

Tabulka 12 – Naměřená data odpadního polyethylenu

	Rychlost pístu [mm/s]	Smyková rychlost $\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	Zdánlivá viskozita η_A [Pa·s]
PE + T 70:30	0,05	11,25	7601,8
PE + T 70:30	0,1	22,5	5314,9
PE + T 60:40	0,05	11,25	5167,1
PE + T 60:40	0,1	22,5	3882,2
PE + T 50:50	0,05	11,25	4637,3
PE + T 50:50	0,1	22,5	3651,3



Graf 1 – Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro odpadní PE

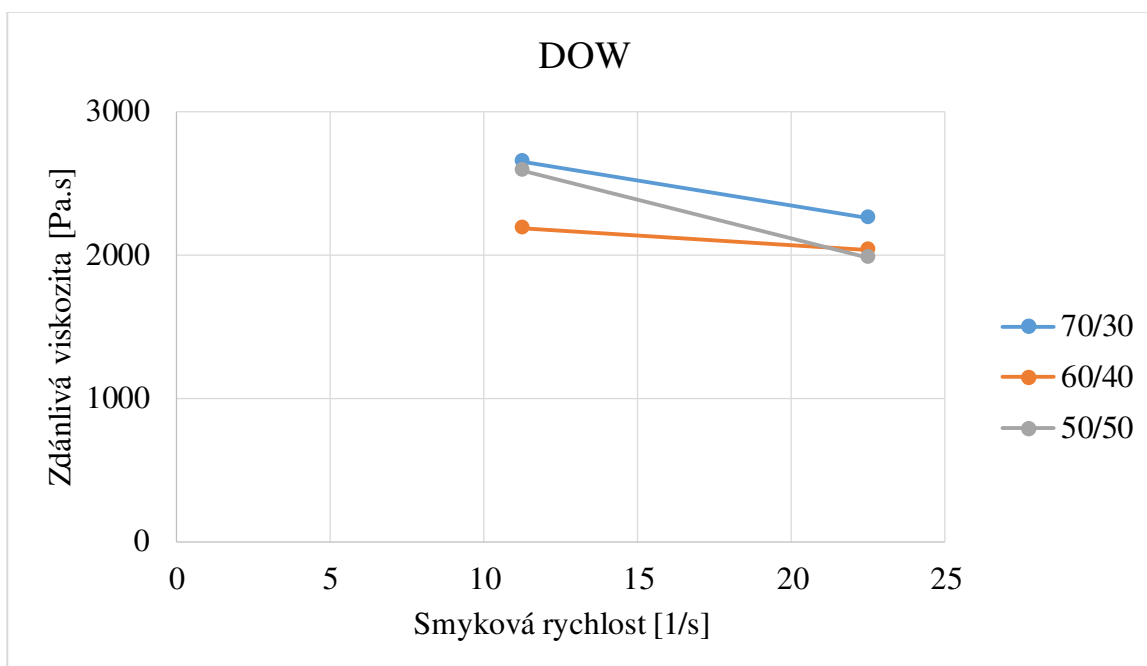
Vyhodnocení

Z Tabulky 12 a z Grafu 1 je zřejmé, že s rostoucím obsahem tetrapaku zdánlivá viskozita klesá. Jelikož odpadní PE je tvořen převážně z LDPE a odpadní tetrapak taktéž LDPE, nejspíše dochází ke zvyšování obsahu polymeru ve vzorku a hliník je unášen materiálem bez zvýšení viskozity.

7.2.2 Polyethylen Dowlex 2631.10UE

Tabulka 13 – Naměřená data polyethylenu Dowlex

	Rychlost pístu [mm/s]	Smyková rychlost $\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	Zdánlivá viskozita η_A [Pa·s]
DOW + T 70:30	0,05	11,25	2649,4
DOW + T 70:30	0,1	22,5	2258,3
DOW + T 60:40	0,05	11,25	2190,2
DOW + T 60:40	0,1	22,5	2034,1
DOW + T 50:50	0,05	11,25	2587,2
DOW + T 50:50	0,1	22,5	1984,1



Graf 2 – Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro PE Dowlex

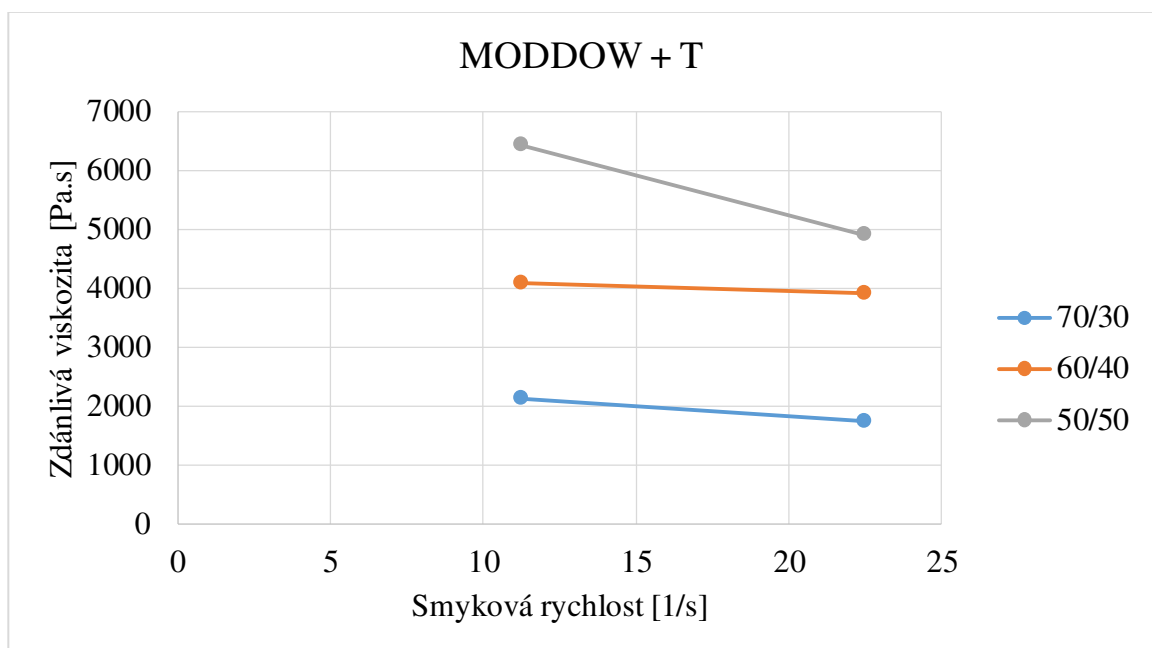
Vyhodnocení

Z Tabulky 13 a Grafu 2 již není patrný pokles viskozity s rostoucím obsahem tetrapaku jako v Tabulce 12 a Grafu 1. V případech 70:30 a 60:40 zde vidíme, že s rostoucím obsahem tetrapaku viskozita klesá, avšak v případě 50:50 je viskozita materiálu na začátku měření téměř totožná jako u 70:30, ale je zde patrný větší pokles viskozity během měření.

7.2.3 Plazmově upravený polyethylen Dowlex 2631.10UE

Tabulka 14 – Naměřená data plazmově upraveného polyethylenu Dowlex

	Rychlost pístu [mm/s]	Smyková rychlost $\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	Zdánlivá viskozita η_A [Pa·s]
MODDOW + T 70:30	0,05	11,25	2128,4
MODDOW + T 70:30	0,1	22,5	1746,5
MODDOW + T 60:40	0,05	11,25	4091,6
MODDOW + T 60:40	0,1	22,5	3918,9
MODDOW + T 50:50	0,05	11,25	6429,3
MODDOW + T 50:50	0,1	22,5	4902,7



Graf 3 – Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro upravený PE Dowlex

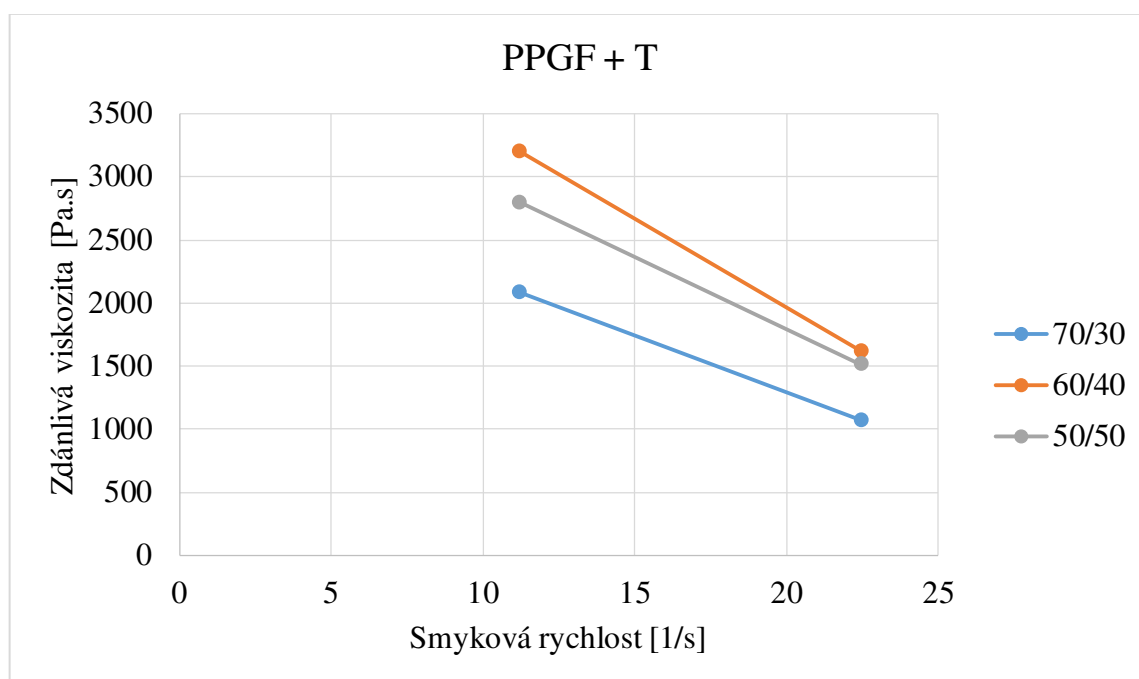
Vyhodnocení

U plazmově upraveného Dowlexu byl potvrzen předpoklad, že tetrapak nepůsobí jako lubrikant, nýbrž působí jako inhibitor tečení. S rostoucím obsahem tetrapaku roste zdánlivá viskozita.

7.2.4 Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken

Tabulka 15 – Naměřená data odpadního polypropylenu obsahující skelná vlákna

	Rychlost pístu [mm/s]	Smyková rychlost $\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	Zdánlivá viskozita η_A [Pa·s]
PPGF + T 70:30	0,05	11,25	2080,9
PPGF + T 70:30	0,1	22,5	1068,2
PPGF + T 60:40	0,05	11,25	3196,1
PPGF + T 60:40	0,1	22,5	1614,2
PPGF + T 50:50	0,05	11,25	2794,7
PPGF + T 50:50	0,1	22,5	1506,7



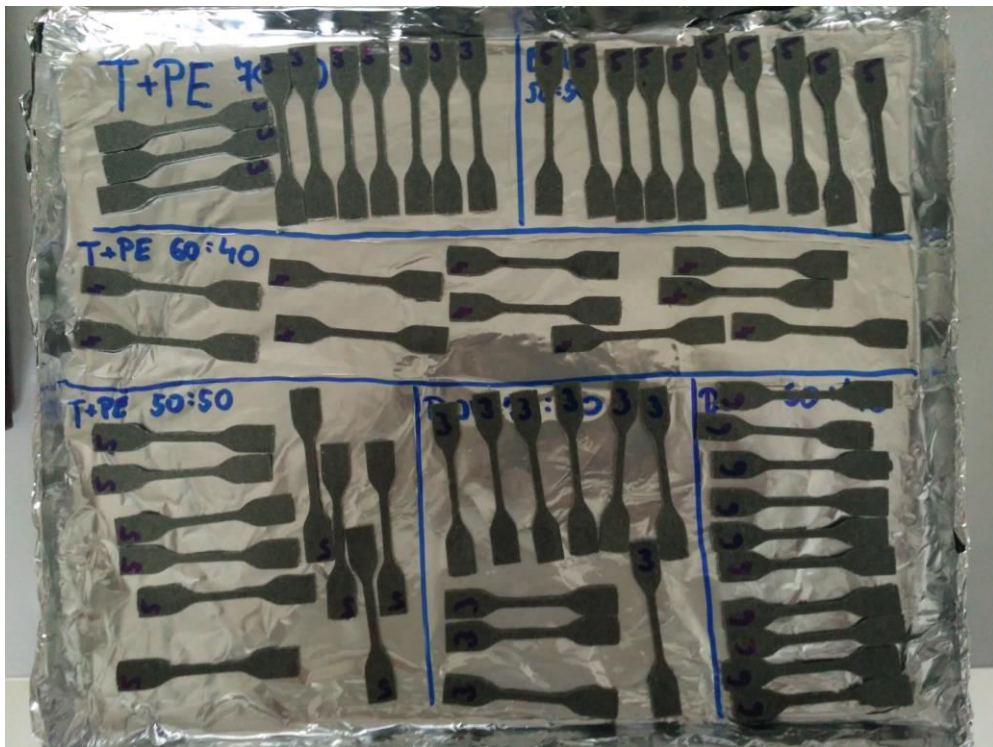
Graf 4 – Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro odpadní PP

Vyhodnocení

U odpadního polypropylenu je situace obdobná jako u modifikovaného polyethylenu. Odpadní tetrapak zde nepůsobí jako lubrikant, nýbrž působí jako inhibitor tečení, kde s rostoucím obsahem tetrapaku roste zdánlivá viskozita.

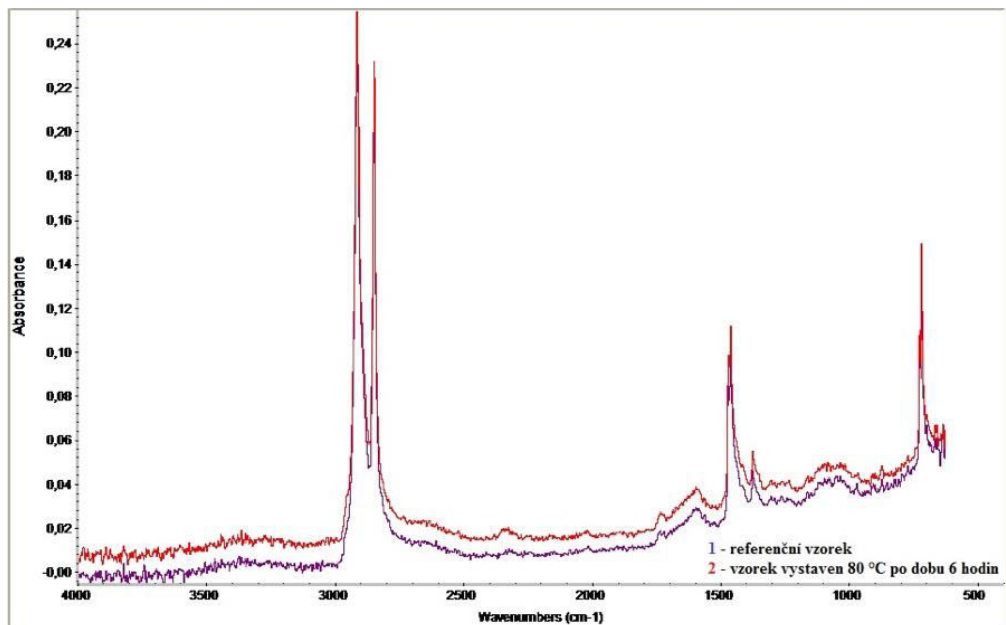
7.3 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR)

Metoda FTIR byla provedena pomocí stroje Nicolet Avatar 320 FT-IR. Jako krystal pro analýzu bylo zvoleno germanium. Metoda FTIR byla provedena na tělískách vysekaných z vylisovaných desek, kdy část tělísek byla podrobena prozkoumání po vysekání, tedy jde o referenční vzorky a druhá část tělísek byla vystavena teplotě 80 °C po dobu 6 hodin viz Obrázek 57 v laboratorní sušárně Binder řady ED.

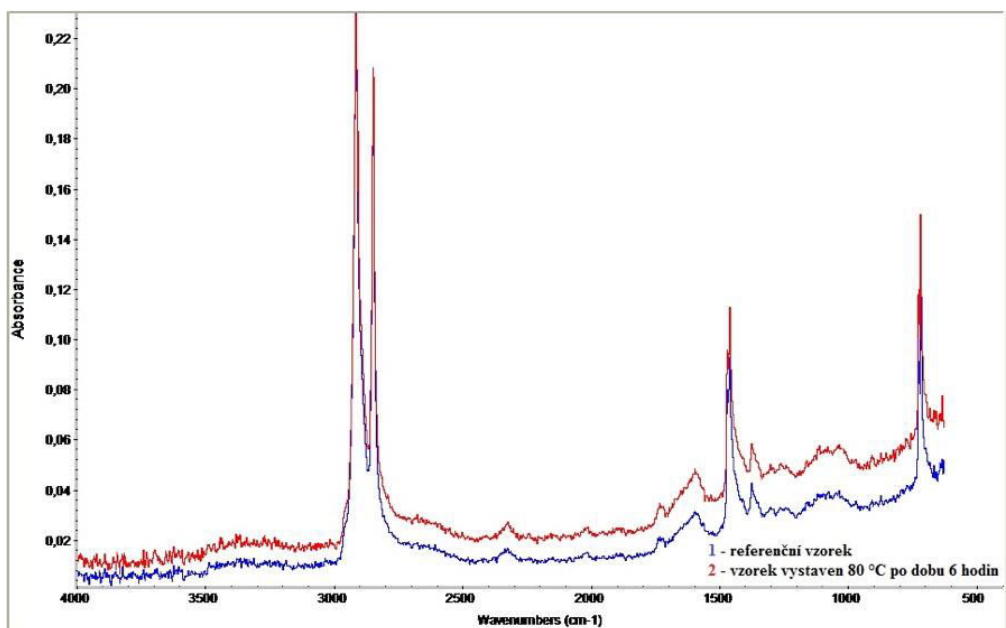


Obrázek 57 – Připravené vzorky do laboratorní sušárny Binder [52]

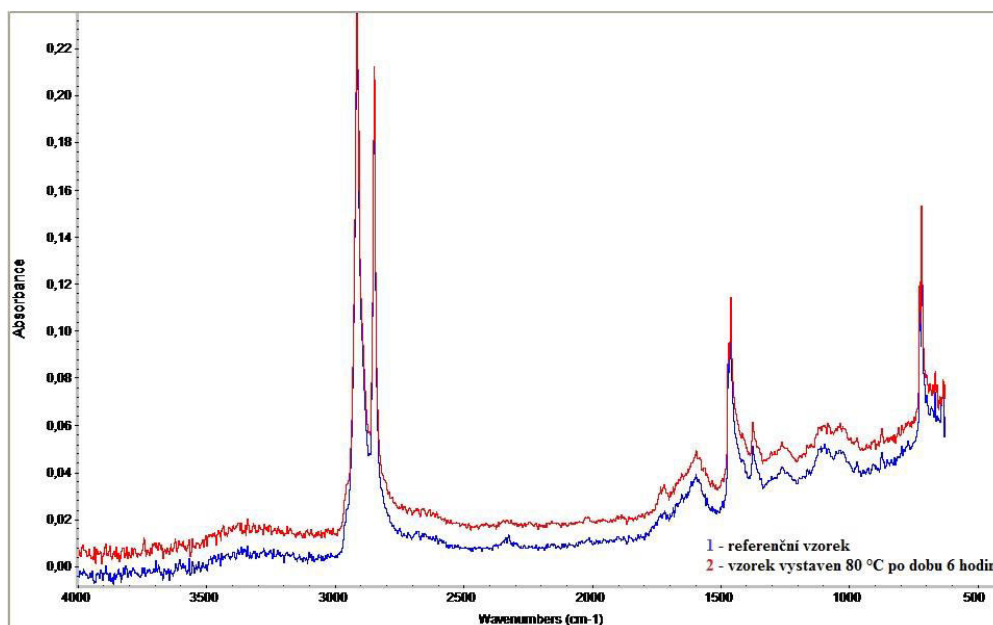
7.3.1 Odpadní polyethylen



Obrázek 58 – Naměřené spektrum odpadního PE a odpadního tetrapaku v poměru 70:30



Obrázek 59 – Naměřené spektrum odpadního PE a odpadního tetrapaku v poměru 60:40

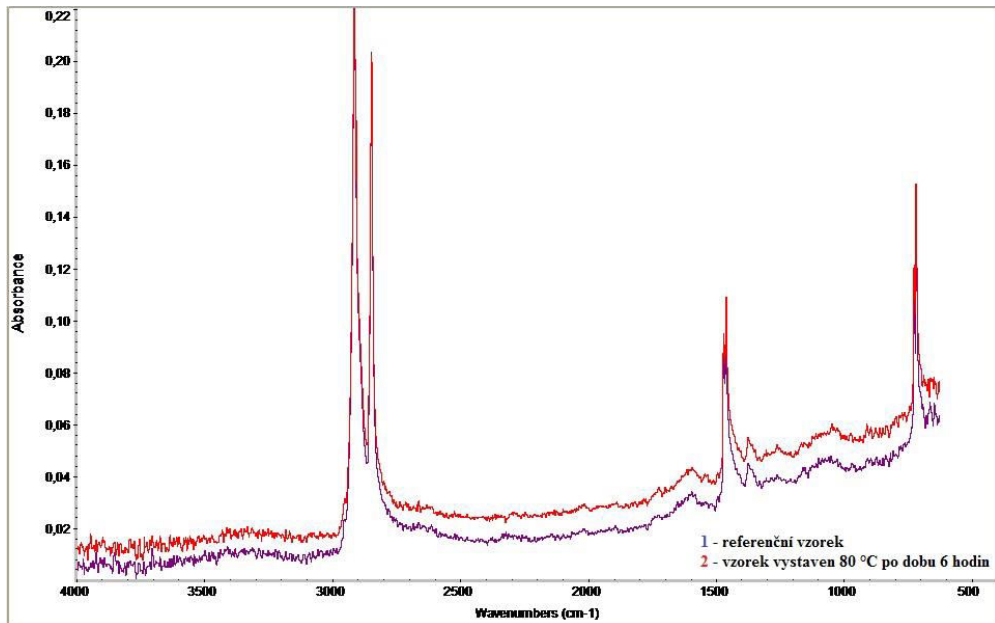


Obrázek 60 – Naměřené spektrum odpadního PE a odpadního tetrapaku v poměru 50:50

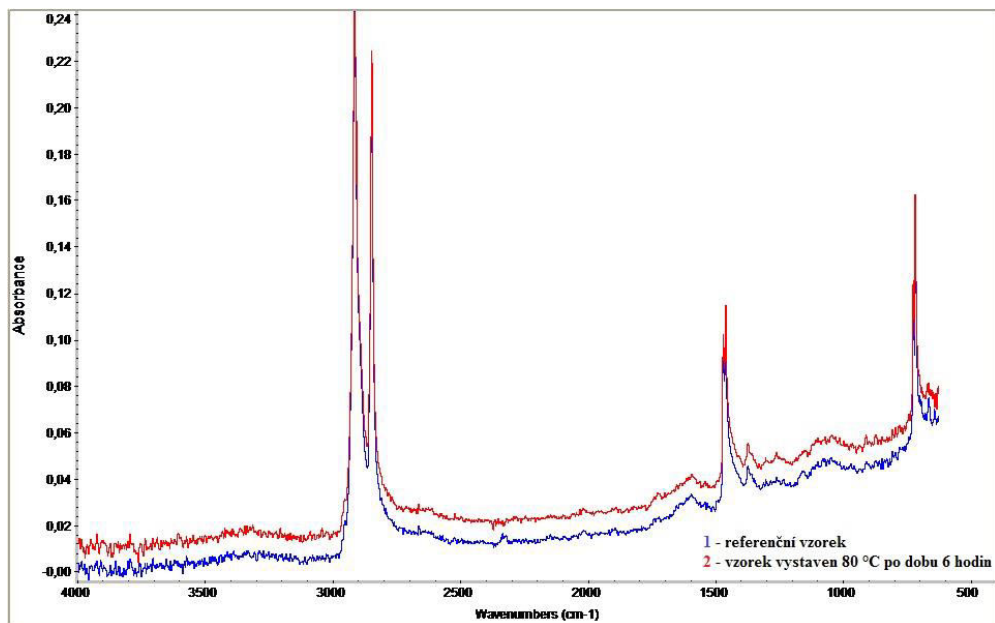
Vyhodnocení

Na Obrázku 58, Obrázku 59 i Obrázku 60 vidíme naměřená spektra. Úvodem můžeme říci, že vidíme totožné spektrum jak referenčního vzorku, tak vzorku, který byl vystaven teplotě 80 °C po dobu 6 hodin. V oblasti 2850 cm⁻¹ a 2900 cm⁻¹ vidíme vibrace způsobené vazbou uhlík a vodík, zkráceně C-H a v oblasti 1600 cm⁻¹ vidíme vibraci způsobenou dvojnou vazbou uhlík uhlík, zkráceně C=C. Jde tedy o typické spektrum PE, které potvrdila i knihovna spekter. Dále můžeme říci, že materiál nedegraduje. Nedošlo k vytvoření karbonylových skupin, které se projevují vibrací v oblasti 1750 cm⁻¹.

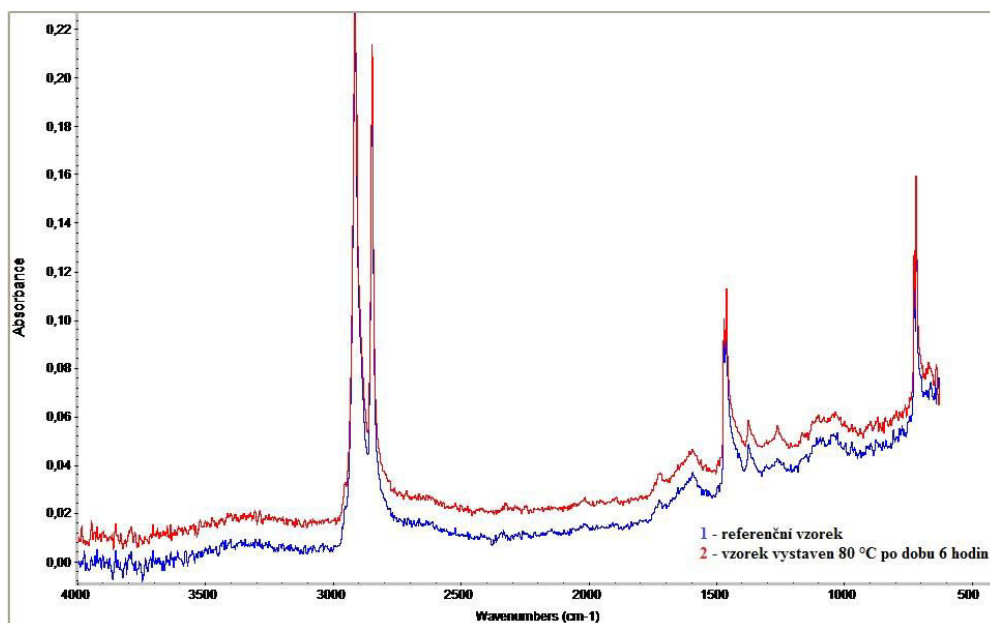
7.3.2 Polyethylen Dowlex 2631.10UE



Obrázek 61 – Naměřené spektrum PE Dowlex a odpadního tetrapaku v poměru 70:30



Obrázek 62 – Naměřené spektrum PE Dowlex a odpadního tetrapaku v poměru 60:40

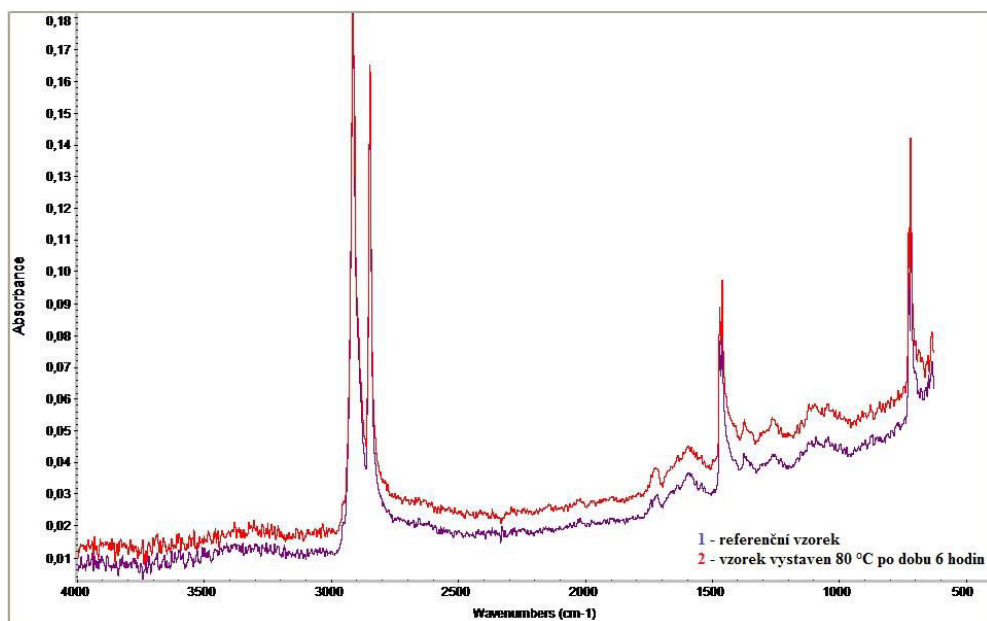


Obrázek 63 – Naměřené spektrum PE Dowlex a odpadního tetrapaku v poměru 50:50

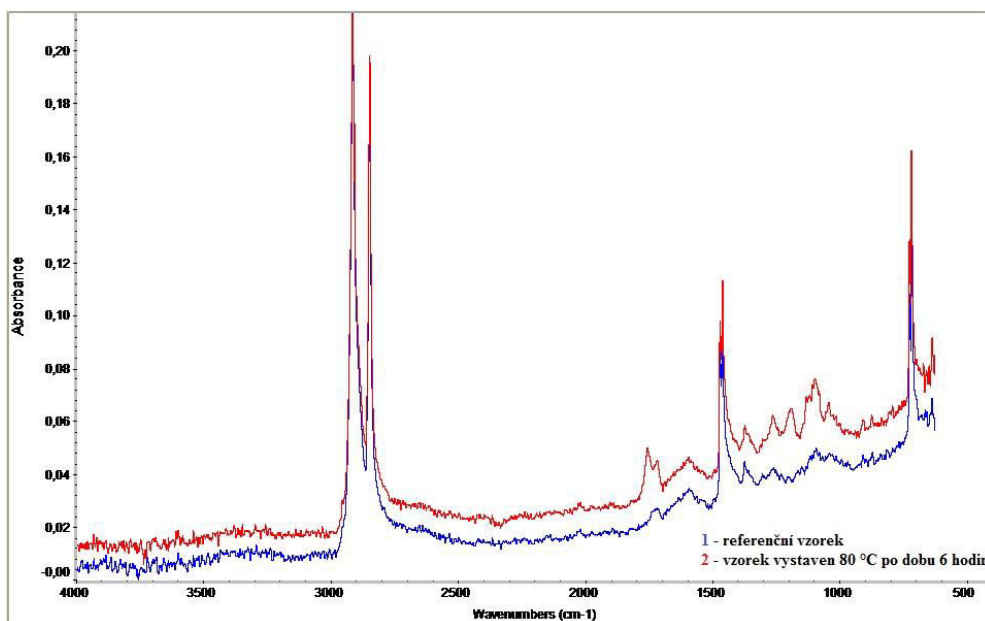
Vyhodnocení

Na Obrázku 61, Obrázku 62 i Obrázku 63 vidíme naměřená spektra materiálu PE Dowlex. Po detailnějším prozkoumání můžeme konstatovat, že daná spektra jsou opět téměř totožná, tudíž nedošlo k degradaci materiálu. U vzorku vystaveného teplotě nedošlo k tvorbě karbonylových skupin, které se projevují vibrací v oblasti 1750 cm⁻¹.

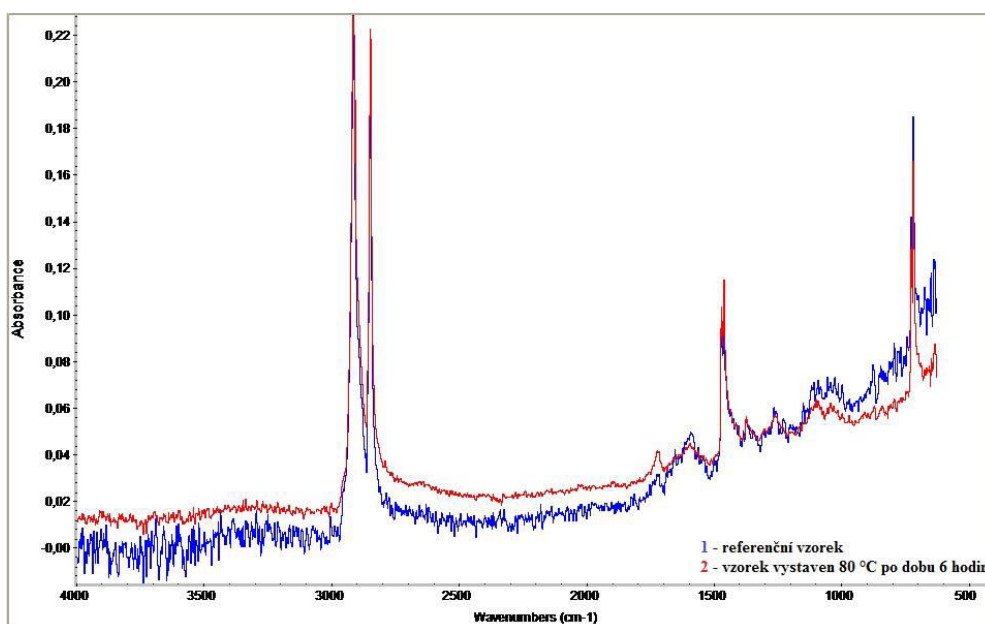
7.3.3 Plazmově upravený polyethylen Dowlex 2631.10UE



Obrázek 64 – Naměřené spektrum upraveného PE a odpadního tetrapaku v poměru 70:30



Obrázek 65– Naměřené spektrum upraveného PE a odpadního tetrapaku v poměru 60:40

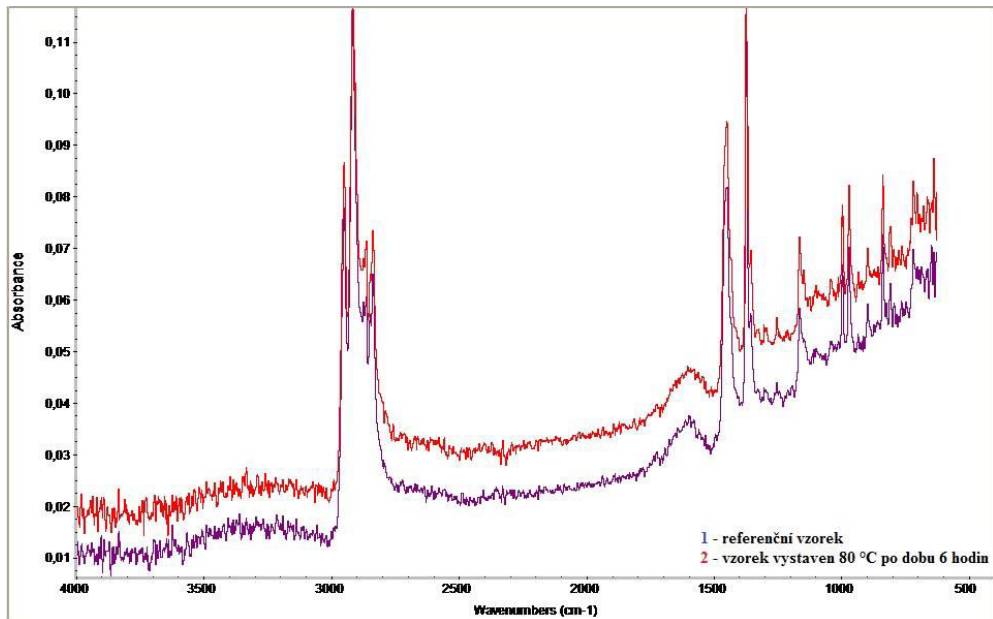


Obrázek 66 – Naměřené spektrum upraveného PE a odpadního tetrapaku v poměru 50:50

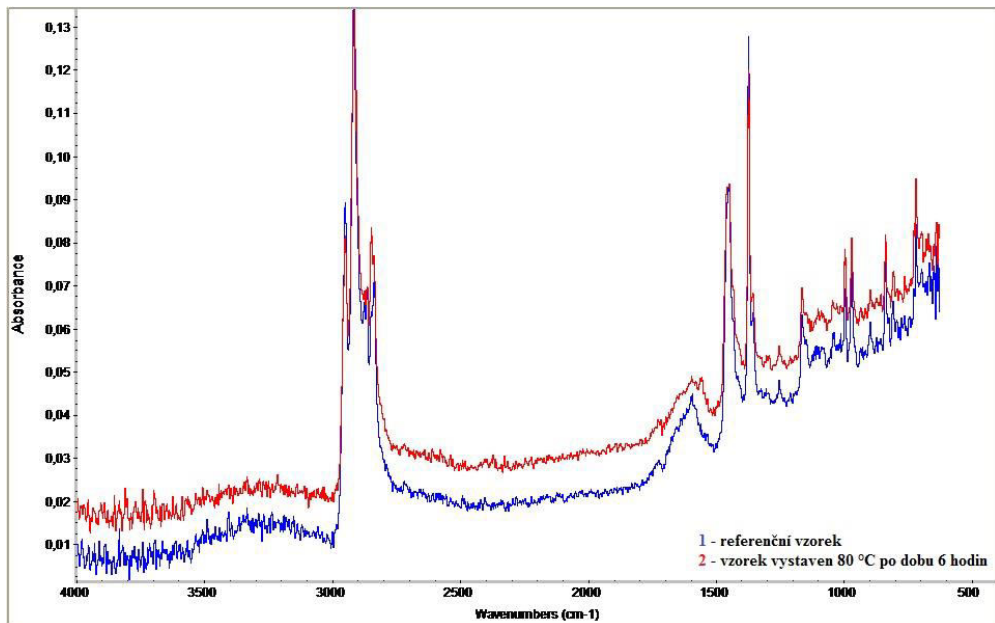
Vyhodnocení

Na Obrázku 64, Obrázku 65 a Obrázku 66 vidíme opět shodná spektra jak u referenčního vzorku, tak u vzorku vystaveného 80 °C po dobu 6 hodin. Pouze u Obrázku 65 je v oblasti 1750 cm⁻¹ nepatrné zvětšení píku. Tato vibrace je však vidět i u referenčního vzorku a je viditelná i na jiných naměřených spektrech PE, takže můžeme usoudit, že se nejedná o vibraci karbonylové skupiny.

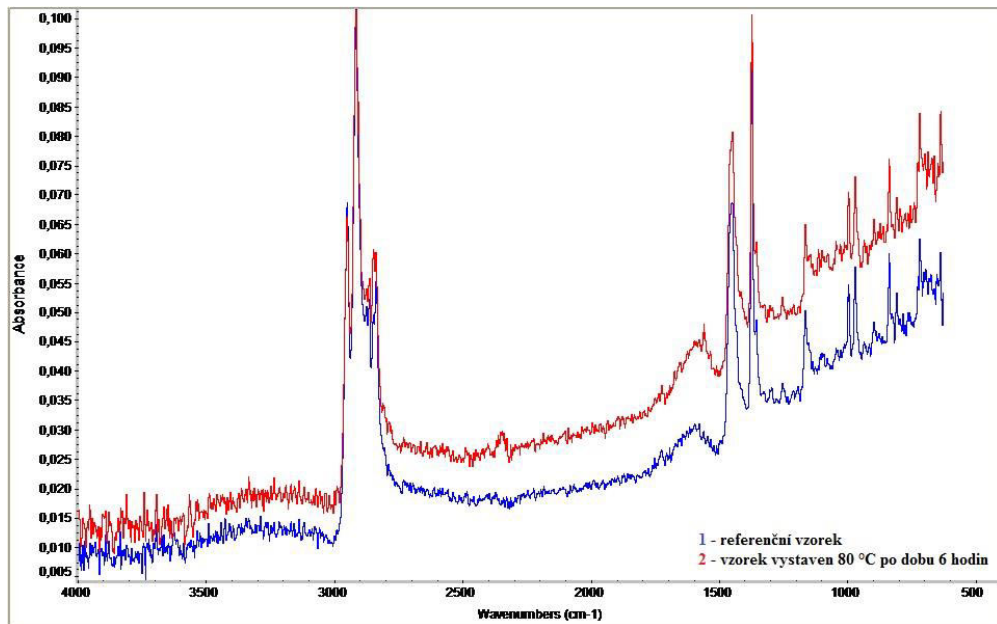
7.3.4 Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken



Obrázek 67 – Naměřené spektrum odpadního PP a odpadního tetrapaku v poměru 70:30



Obrázek 68 – Naměřené spektrum odpadního PP a odpadního tetrapaku v poměru 60:40



Obrázek 69 – Naměřené spektrum odpadního PP a odpadního tetrapaku v poměru 50:50

Vyhodnocení

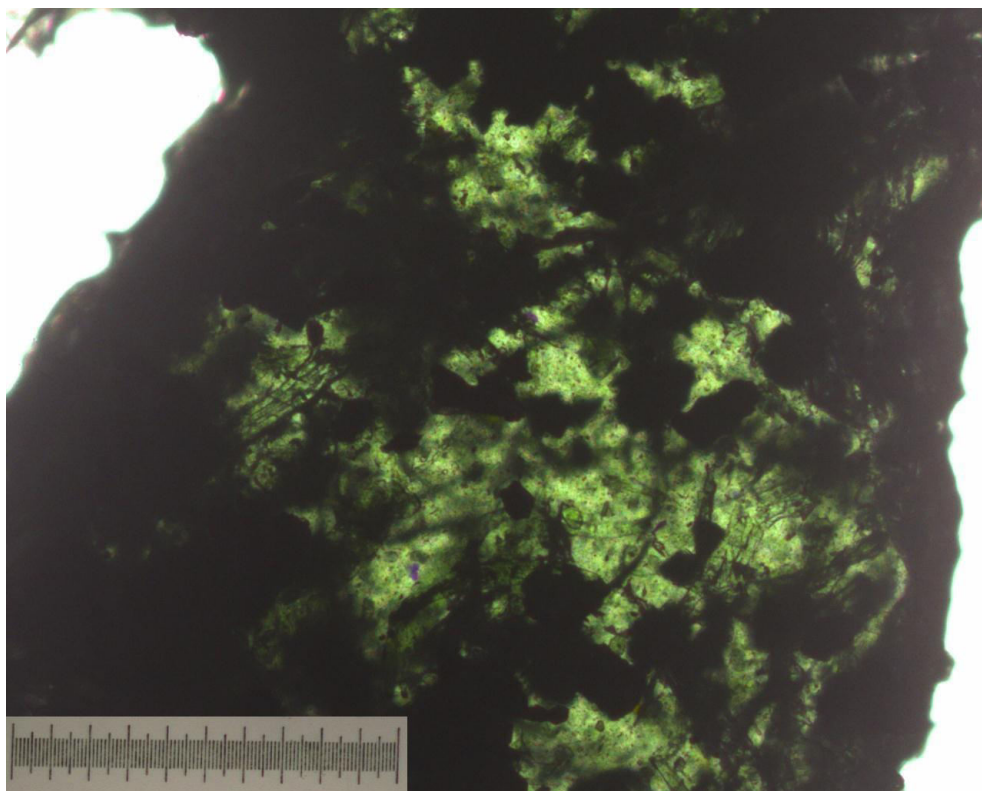
Na Obrázku 67, Obrázku 68 a Obrázku 69 vidíme naměřená spektra odpadního PP obsahující 16 hmot. % skelných vláken a odpadní tetrapak v určitém poměru. Opět z naměřených spekter můžeme usoudit, že ani v případě odpadního PP nedošlo k vytvoření karbonylových skupin, tudíž daný materiál po vystavení zvýšené teplotě nedegraduje.

7.4 Mikroskopie

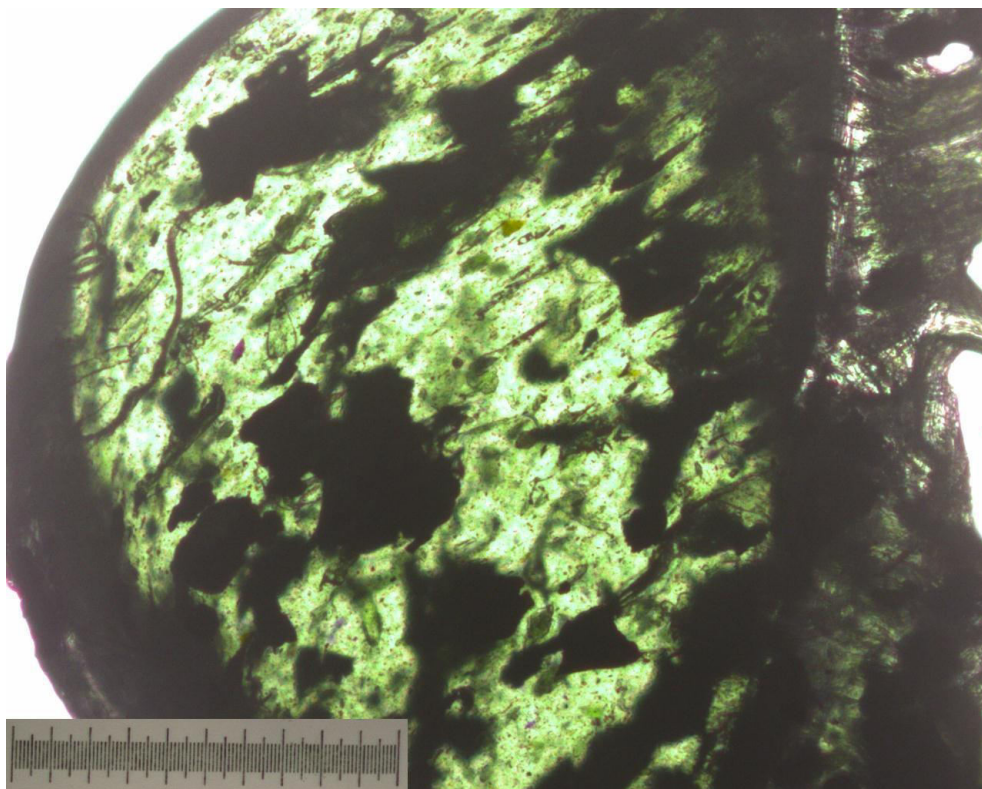
Mikroskopie byla provedena pomocí biologického mikroskopu viz Obrázek 36, který byl osazen fotoaparátem komunikující se stolním počítačem. Zaostření vzorků bylo tedy možné jak sledováním objektů v okulárech, tak na obrazovce PC. Materiál byl připraven pomocí ručního mikrotomu. Mikrotom je přístroj, který slouží k řezání materiálu a dokáže řezat velmi tenké řezy právě pro mikroskopování.

Vylisovaný vzorek dané směsi byl upevněn v ručním mikrotomu a otáčivým pohybem rukojeti mikrotomu došlo k pohybu nože a k řezání vzorku. Byly připraveny tenké řezy materiálu, které byly vloženy mezi dvě sklíčka a pomocí svorek se sklíčka uchytily k sobě. Následně byly sklíčka i s materiálem vloženy do mikroskopu, konkrétně na stolek s držákem a pomocí objektivu 4x0,10 byly pozorovány. Po zaostření a vizuální kontrole pomocí okulárů a PC obrazovky došlo pomocí fotoaparátu k tvorbě fotografií. Tímto způsobem byly vyrobeny fotografie všech vzorků.

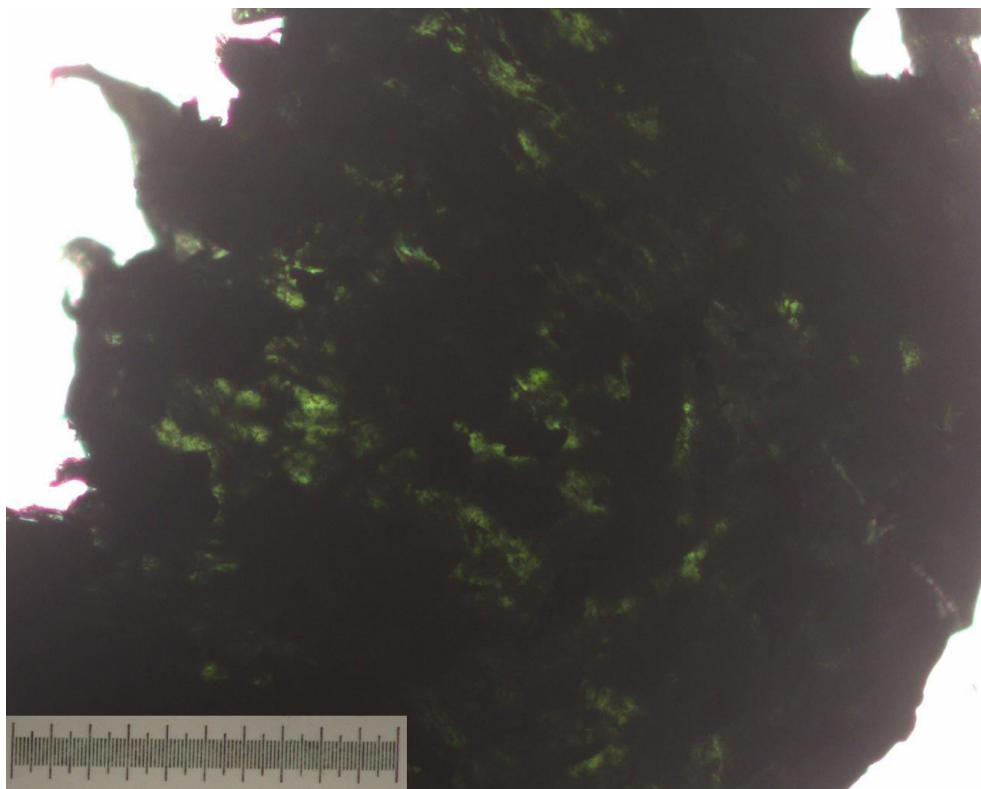
7.4.1 Odpadní polyethylen



Obrázek 70 – Odpadní PE a odpadní tetrapak v poměru 70:30



Obrázek 71 – Odpadní PE a odpadní tetrapak v poměru 60:40



Obrázek 72 – Odpadní PE a odpadní tetrapak v poměru 50:50

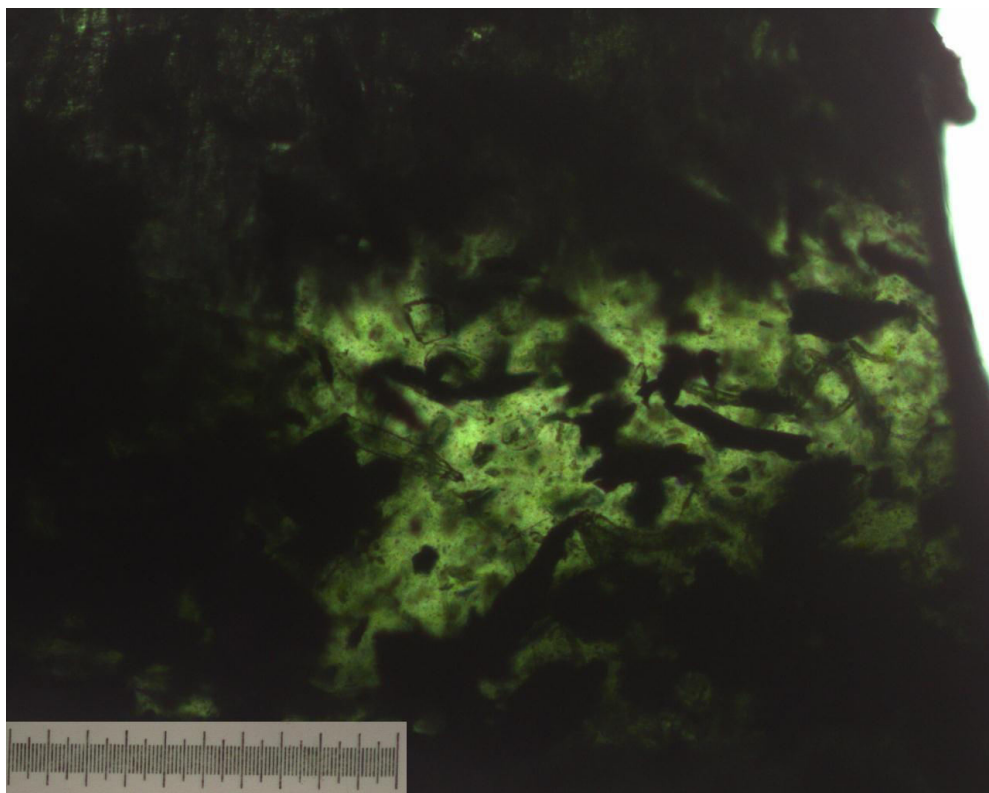
Vyhodnocení

Na Obrázku 70 vidíme směs odpadního PE a odpadního tetrapaku v poměru 70:30. Při bližším zkoumání uvidíme odpadní tetrapak rozptýlen v materiálu. Můžeme zde zpozorovat pár geometrických útvarů, které mohou pocházet z hliníku. Tyto útvary mohly vzniknout při rozdužení v rozvlákňovači či později při přípravě odpadního tetrapaku v Platex Planetary Extruder viz Obrázek 40.

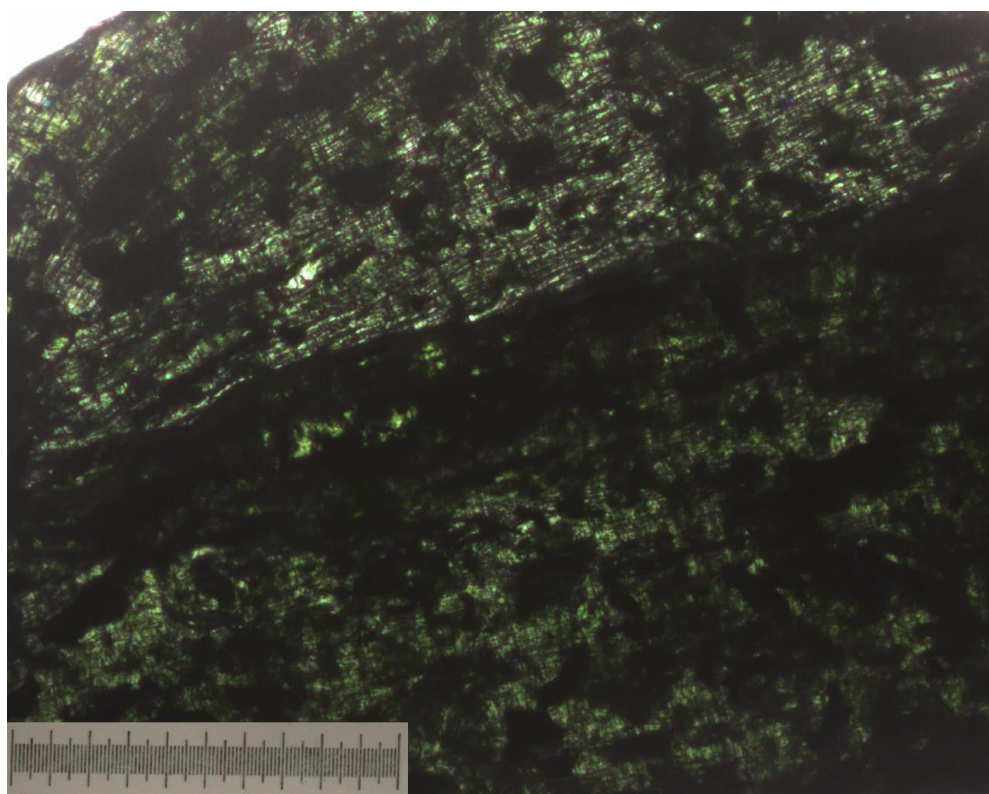
Na Obrázku 71 vidíme směs odpadního PE a odpadního tetrapaku v poměru 60:40. Tento vzorek se podařilo lépe připravit a taky lépe prosvítit. Můžeme zde spatřit odpadní tetrapak, který je krásně rozptýlen v materiálu.

Na Obrázku 72 vidíme směs odpadního PE obsahující 50 hmot. % odpadního tetrapaku. Je zřejmé, že zvyšující obsah odpadního tetrapaku nám znemožňuje detailnější pohled do nitra materiálu a vzorek je více tmavý než u směsí obsahující méně hmotnostních % odpadního tetrapaku.

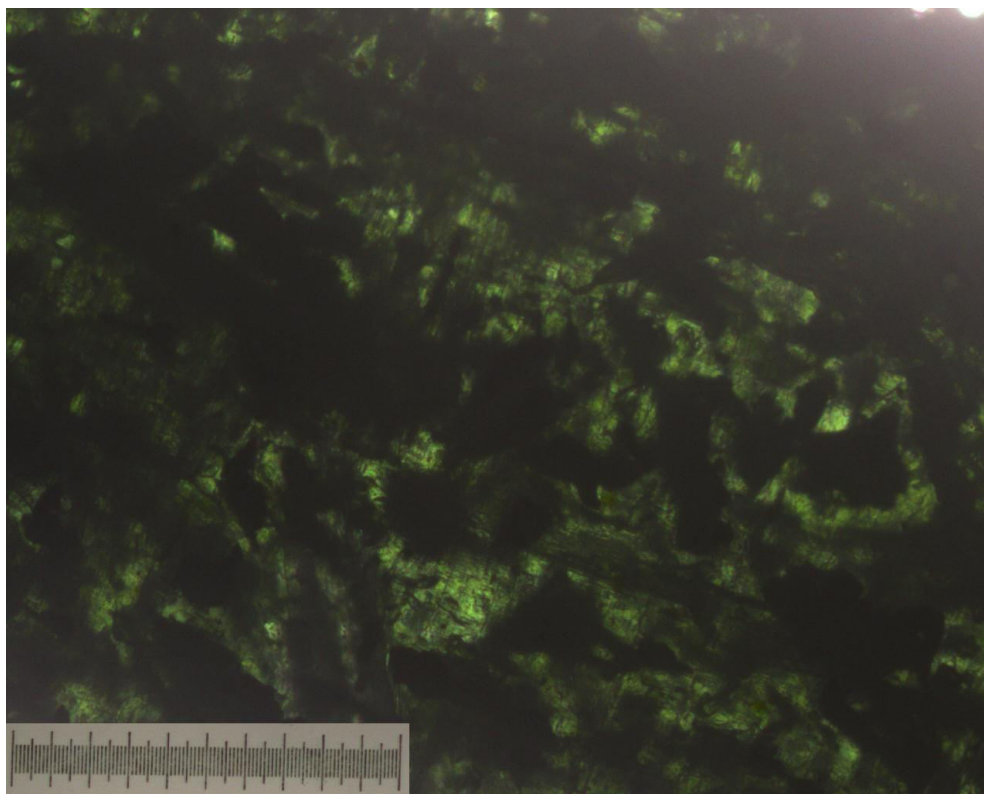
7.4.2 Polyethylen Dowlex 2631.10UE



Obrázek 73 – PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 70:30



Obrázek 74 – PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 60:40



Obrázek 75 – PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 50:50

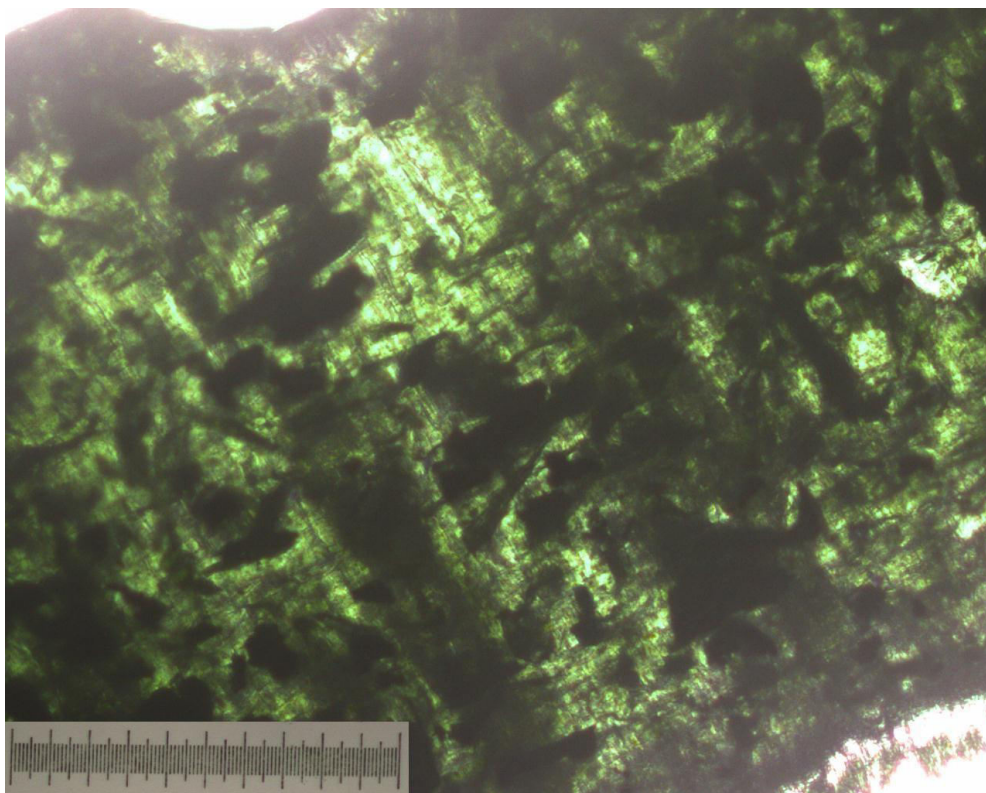
Vyhodnocení

Na Obrázku 73 vidíme PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 70:30. Vidíme zde krásný detail odpadního tetrapaku, který je rozptýlen v materiálu PE Dowlex. Můžeme pozorovat objekty různých velikostí a tvarů. Tyto fragmenty jsou pozůstatkem kdysi fungujícího aseptického obalu od nápoje. Jedná se především o zbytky PE vrstev, hliníkové vrstvy a PE uzavíratelných víček.

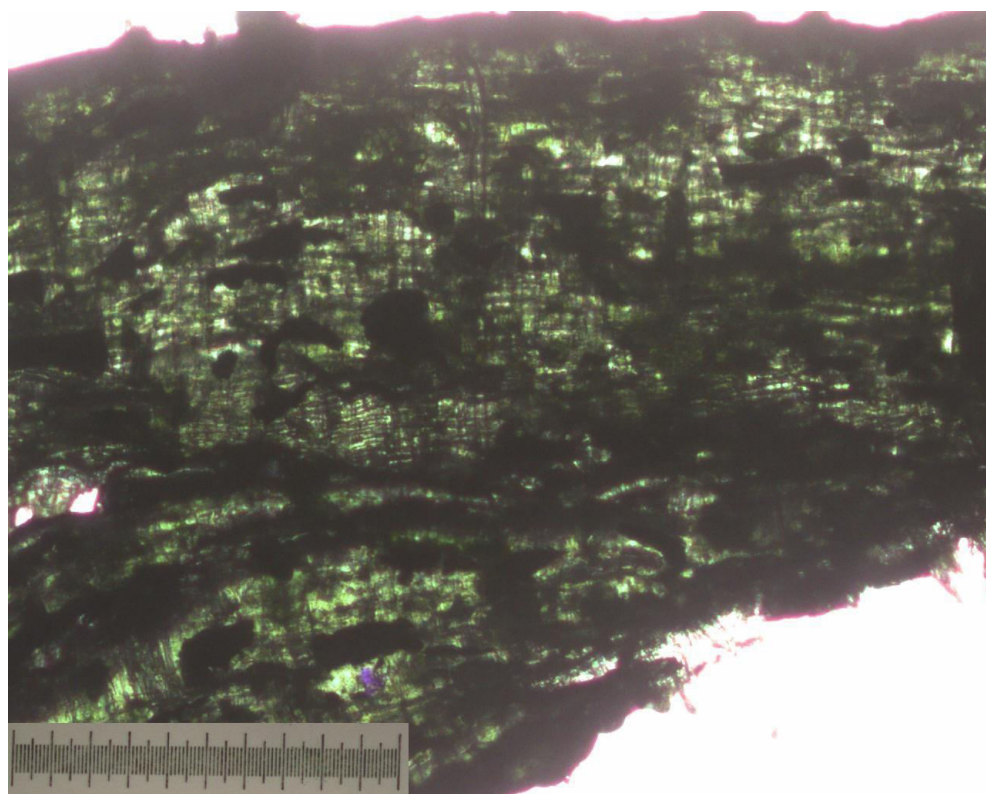
Na Obrázku 74 je znázorněn PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak v poměru 60:40. Můžeme si povšimnout, že zde nejsou žádná místa, která by nebyla vyplněna odpadním tetrapakem. Nachází se zde ale i tmavá místa, která s největší pravděpodobností nebudou aglomeráty, nýbrž větší kusy fragmentů z původně aseptického obalu, které se ani při rozduřování odpadního papíru, ani při přípravě odpadního tetrapaku nepodařilo rozmělnit na menší kusy.

Na Obrázku 75 vidíme PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 50:50. S rostoucím obsahem odpadního tetrapaku roste i tmavost zobrazovaného vzorku. Toto ztmavení je způsobeno zvýšeným obsahem plniva, nejspíše hliníku, který brání průchodu světla.

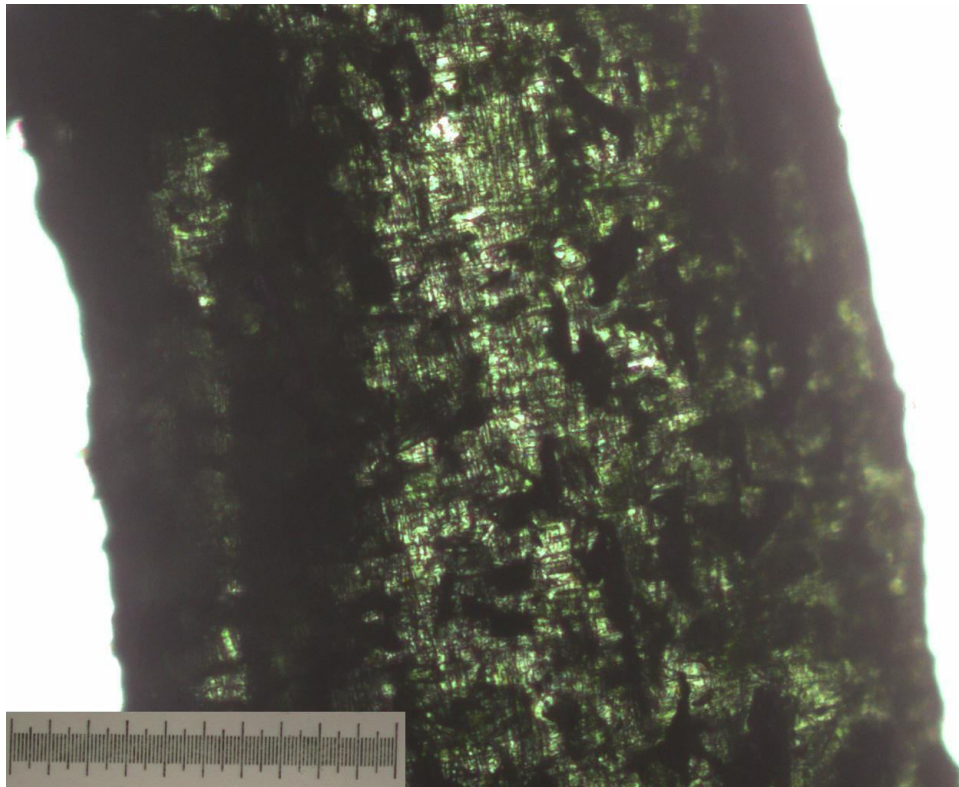
7.4.3 Plazmově upravený polyethylen Dowlex 2631.10UE



Obrázek 76 – Upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 70:30



Obrázek 77 – Upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 60:40



Obrázek 78 – Upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 50:50

Vyhodnocení

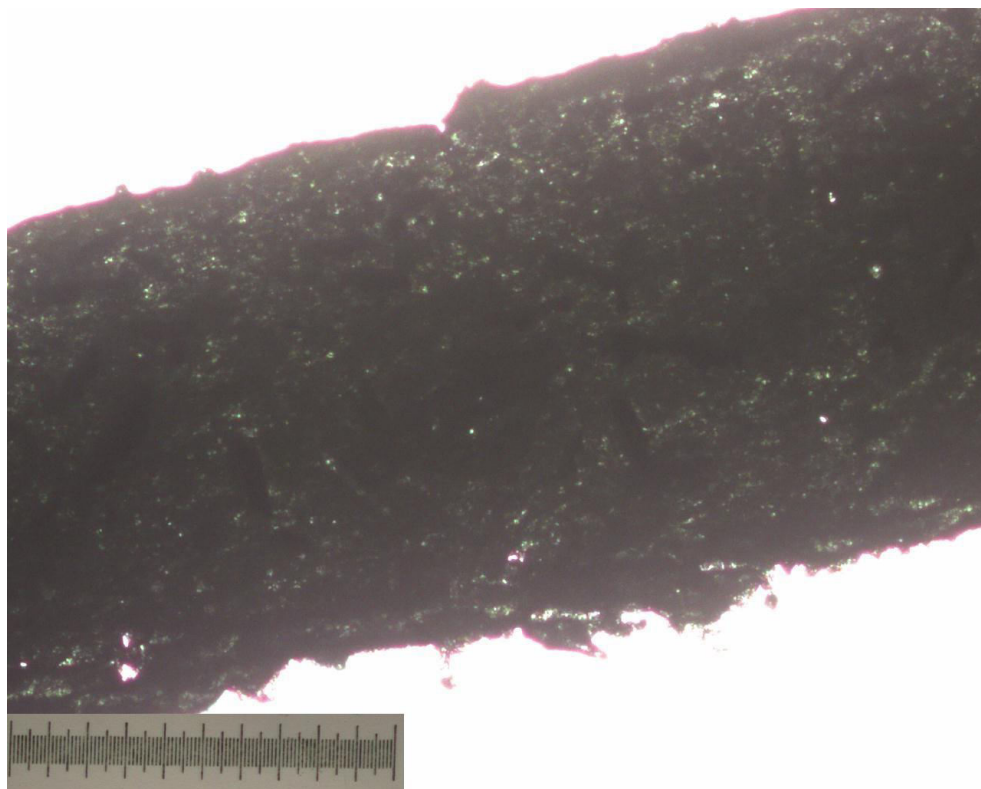
Na Obrázku 76 je vyobrazen plazmově modifikovaný PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak v poměru 70:30. Vidíme kusy odpadního tetrapaku, které jsou obklopeny čistým polymerním materiálem PE Dowlex od společnosti Dow Chemical Company, který byl plazmově modifikován firmou SurfaceTreat a.s..

Na Obrázku 77 se nachází plazmově modifikovaný PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak v poměru 60:40. Oproti nemodifikovanému PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak viz Obrázek 74 zde není pozorovatelný rozdíl.

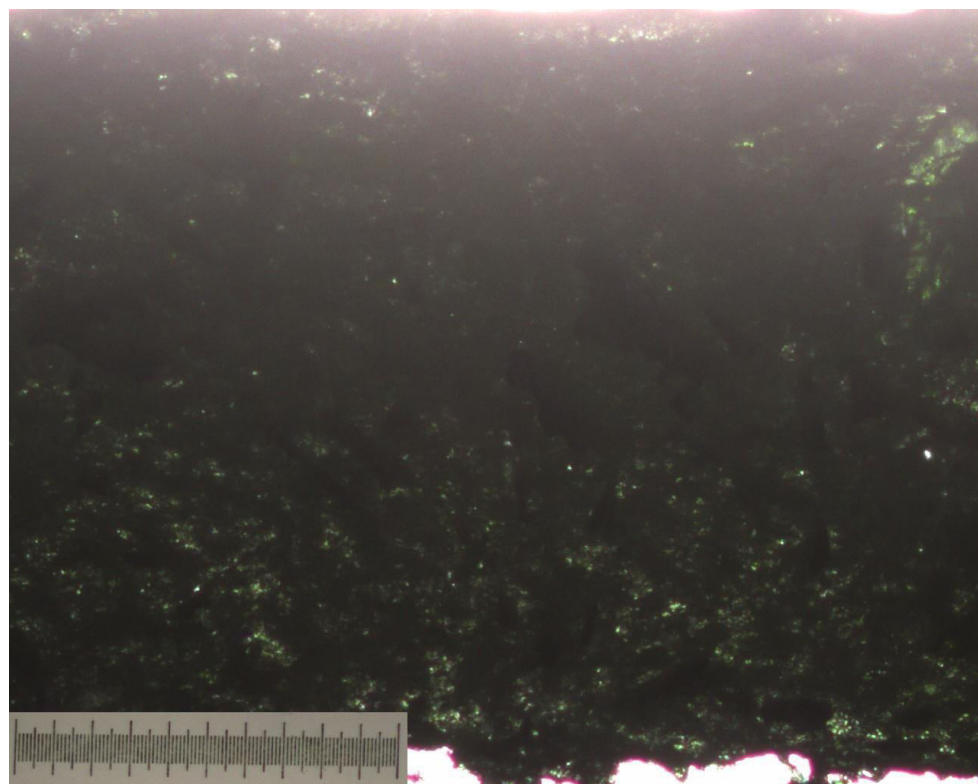
Na Obrázku 78 je zachycen plazmově modifikovaný PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak v poměru 50:50. Oproti ostatním vzorkům zde není patrné zatmavení materiálu, avšak roli hraje i příprava materiálu pomocí ručního mikrotomu.

Při celkovém vizuálním zhodnocení není patrná změna u plazmově modifikovaného PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak a u čistého PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak.

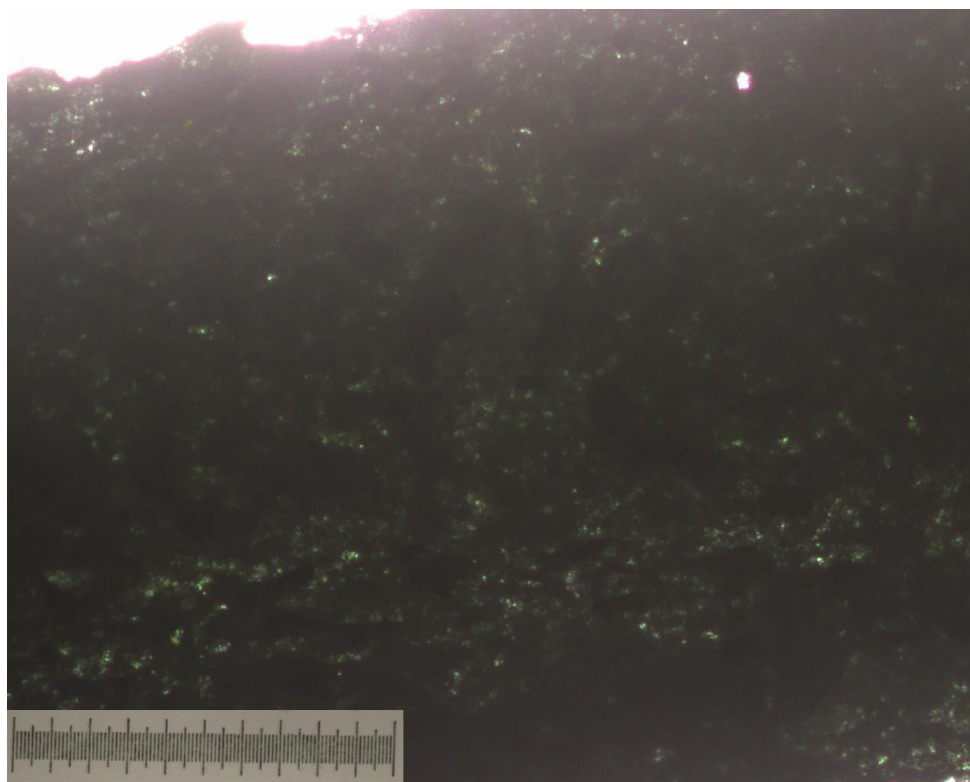
7.4.4 Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken



Obrázek 79 – Odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 70:30



Obrázek 80 – Odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 60:40



Obrázek 81 – Odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 50:50

Vyhodnocení

Na Obrázku 79 se nachází směs obsahující odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 70:30. Z obrázku je patrné, že se v materiálu nacházejí mikroskopické dutiny či praskliny, které jsou způsobeny uzavřenou vlhkostí v materiálu, která se uzavřela při vytlačování strun (při chlazení ve vodní lázni). Vlhkost se podařilo částečně odstranit při granulaci a následném sušení, avšak ne zcela. Při lisování vzorků docházelo k odpařování vody během lisování, proto zde můžeme pozorovat mikroskopické dutiny či praskliny.

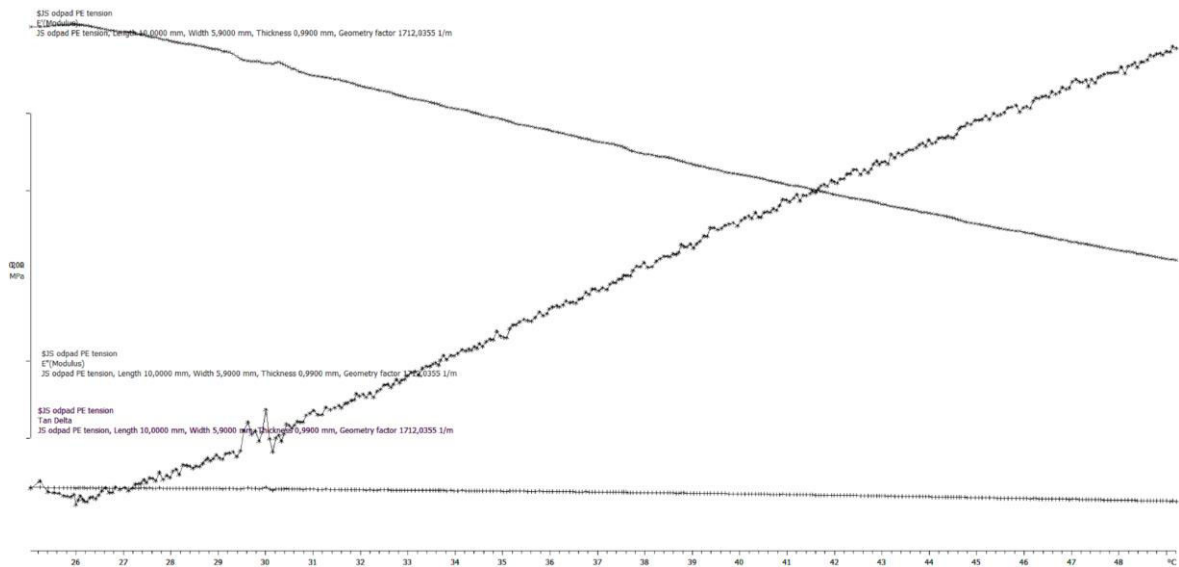
Na Obrázku 80 vidíme směs obsahující odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 60:40. Zde se nacházejí mikroskopické dutiny či praskliny taktéž, jako na Obrázku 79. Na Obrázku 81 je vyobrazena směs obsahující odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 50:50. Zde se nacházejí mikroskopické dutiny rovněž jako na Obrázku 79.

Na Obrázku 79, Obrázku 80 i na Obrázku 81 jsou zachycena skelná vlákna. Všechny vyobrazené vzorky odpadního PP a odpadního tetrapaku jsou tmavší než například odpadního PE. Je to dáno tím, že odpadní PP obsahoval nejen skelná vlákna, ale i v menší míře pravděpodobně přídavek sazí, neboť byl tmavší než odpadní PE viz Obrázek 44.

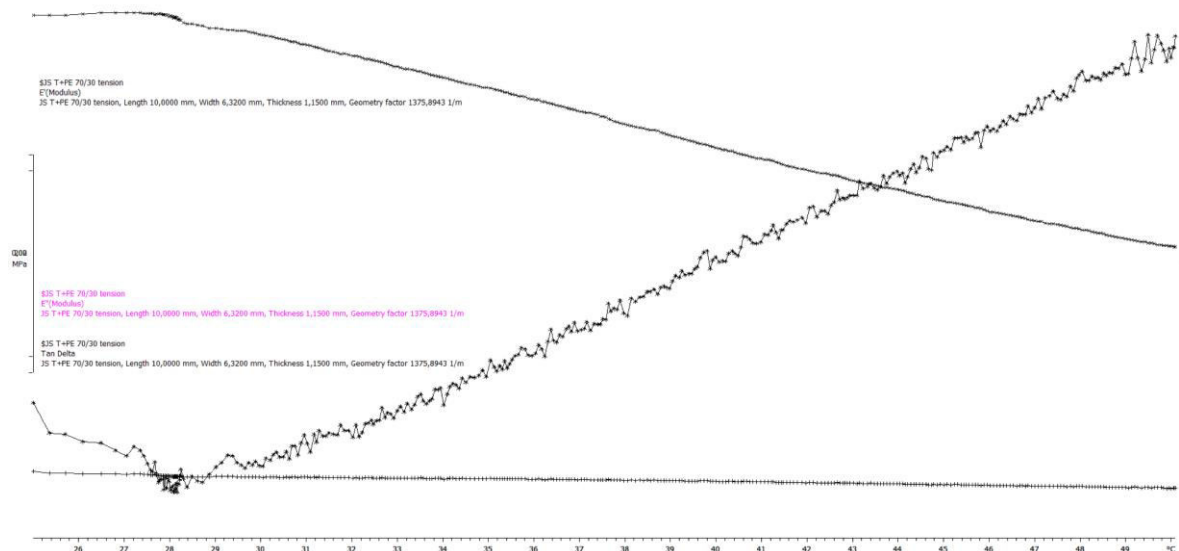
7.5 Dynamická mechanická analýza (DMA)

Metoda DMA byla provedena na přístroji DMA viz Obrázek 37 od společnosti Mettler Toledo. Měření probíhalo v tahu a probíhalo v intervalu teplot od 25 °C do 50 °C. Testovány byly všechny vyrobené směsi i všechny připravené koncentrace.

7.5.1 Odpadní polyetylen



Obrázek 82 – Průběh měření pro odpadní PE

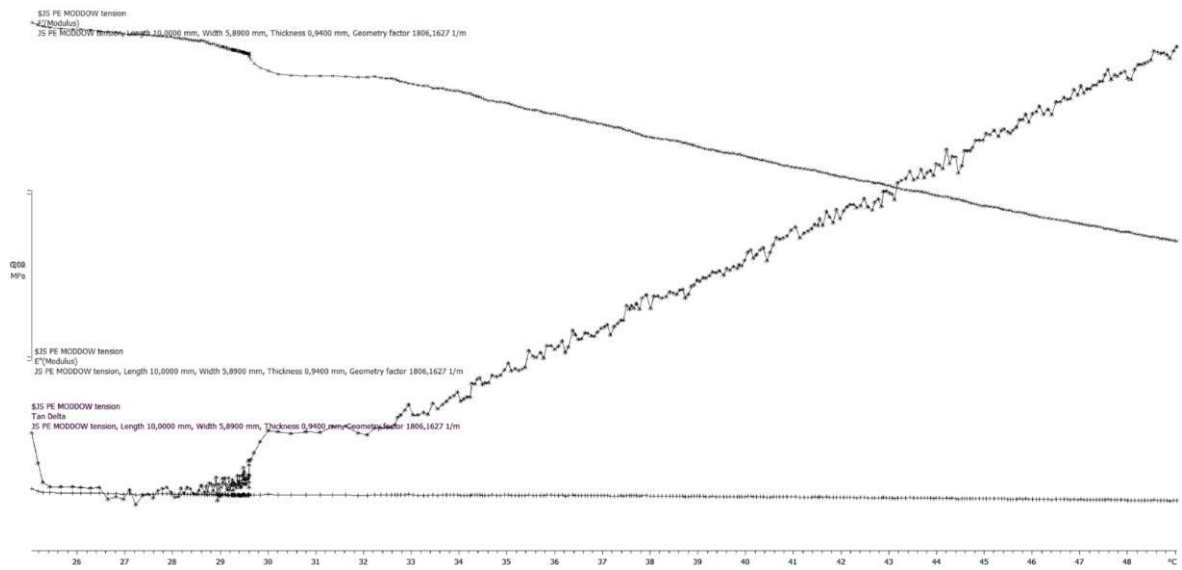


Obrázek 83 – Průběh měření pro odpadní PE a odpadní tetrapak 70:30

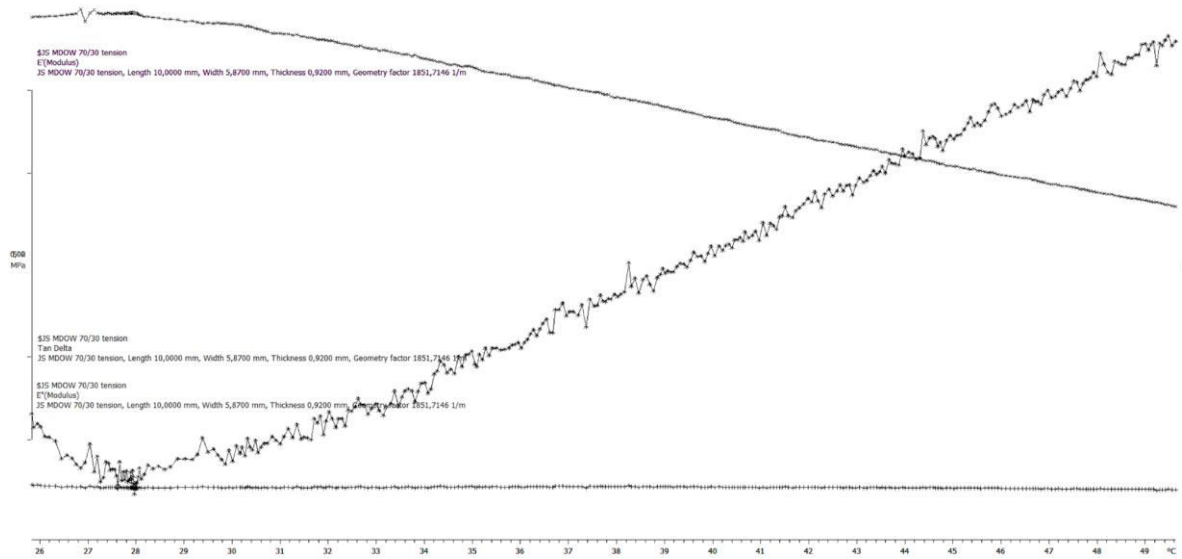
Vyhodnocení

Z Obrázku 82 a Obrázku 83 můžeme usoudit, že přidavek plniva ani koncentrace plnění nemají výrazný vliv na změnu vnitřní tuhosti.

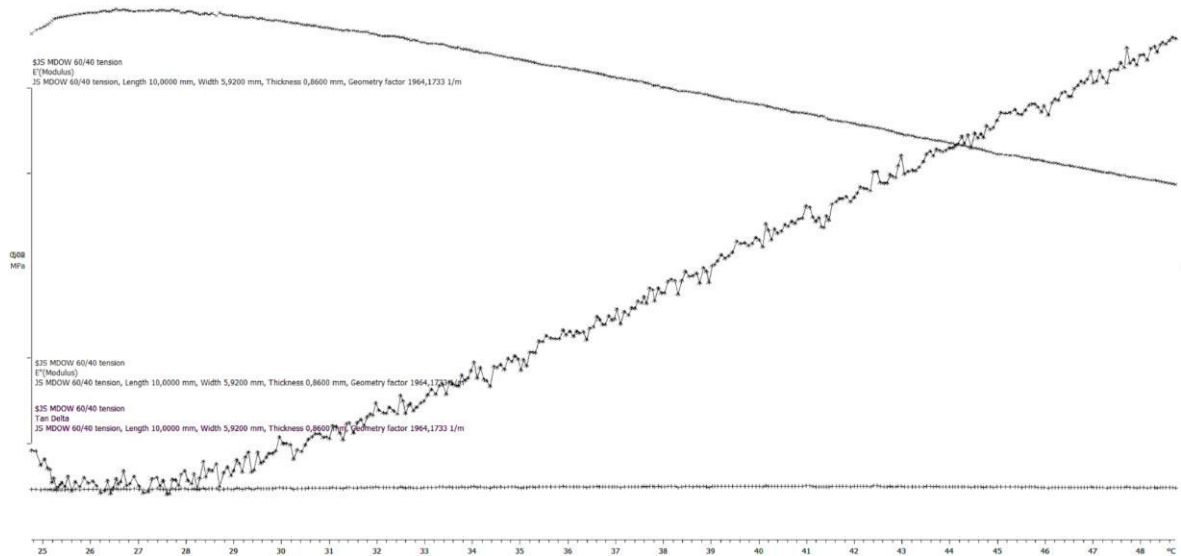
7.5.2 Plazmově modifikovaný polyetylen Dowlex 2631.10 UE



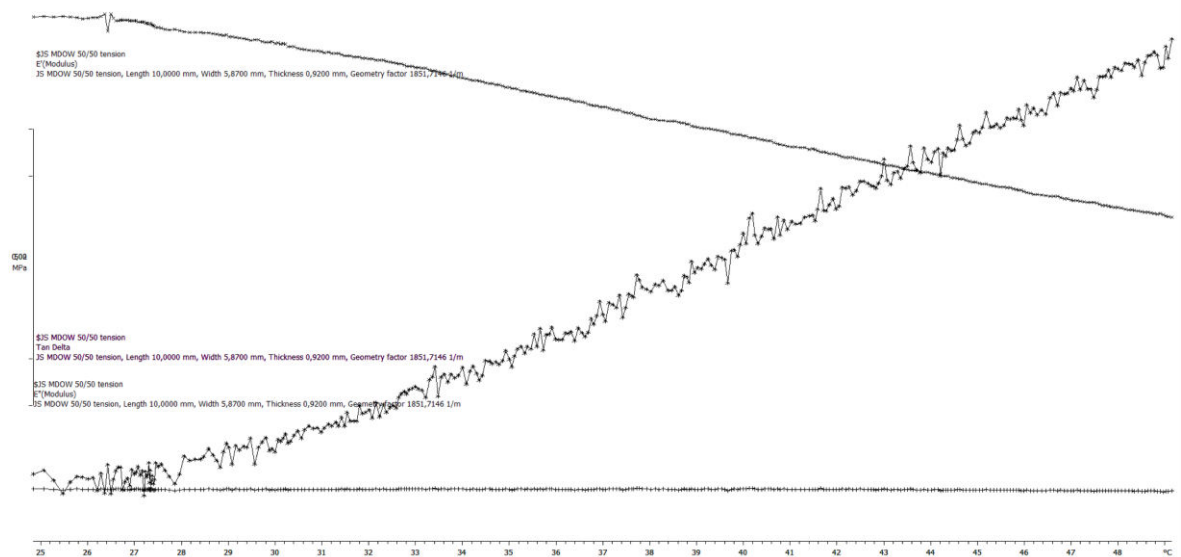
Obrázek 84 – Průběh měření pro čistý upravený PE Dowlex



Obrázek 85 – Průběh měření pro upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak 70:30



Obrázek 86 – Průběh měření pro upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak 60:40

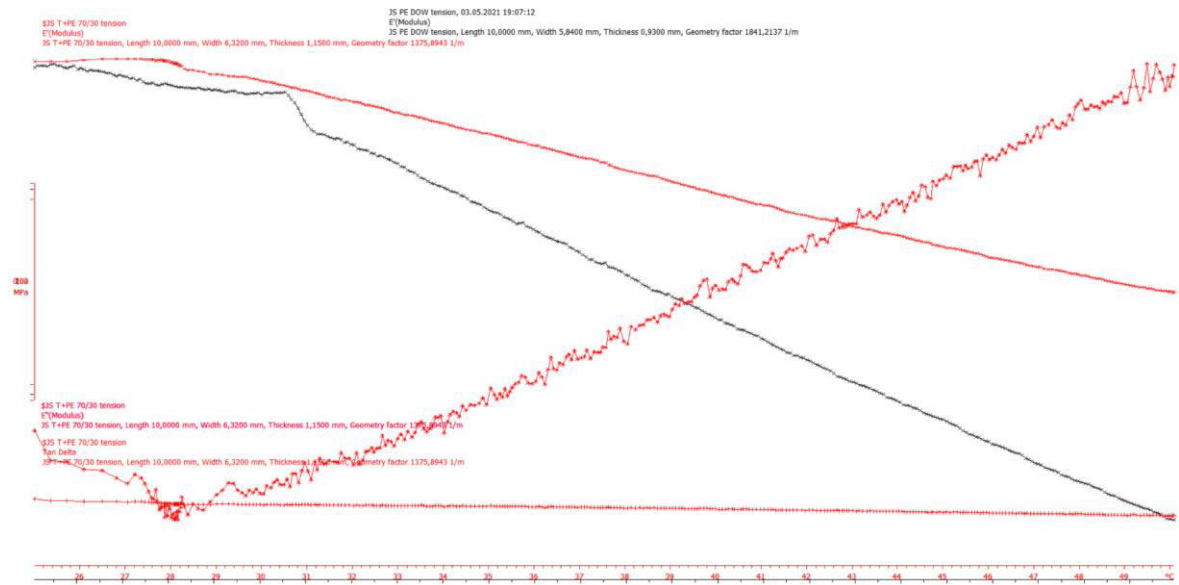


Obrázek 87 – Průběh měření pro upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak 50:50

Vyhodnocení

Z naměřených průběhů pro upravený PE Dowlex můžeme usoudit, že stejně jako v případě odpadního PE nedochází ke změně vnitřní tuhosti způsobené přidavkem plniva.

7.5.3 Srovnání plněného a čistého polymeru



Obrázek 88 – Průběh měření plněného a čistého PE

Vyhodnocení

Na Obrázku 88 vidíme srovnání plněného odpadního PE a čistého neplněného PE. Můžeme konstatovat, že přidavek plniva (odpadního tetrapaku) ani jeho zvyšující koncentrace v materiálu nemá vliv na změnu vnitřní tuhosti materiálu.

7.6 Propustnost pro plyny

Měření plynopropustnosti u připravených směsí měla přiblížit chování heterogenních materiálů v praxi.

Propustnost pro plyny byla měřena při teplotě 30 °C a rozdílu tlaku 3 bary (0,3 MPa) pomocí měřicího zařízení viz Obrázek 38. Jako měřicí médium byl zvolen vzduch. GTR (gas transmission rate) je rychlost transmise (prostupu) plynu.

7.6.1 Odpadní polyethylen

Měření plynopropustnosti u odpadního polyethylenu obsahující odpadní tetrapak proběhlo téměř u všech koncentrací, pouze u PE + T 60:40 se nepodařilo naměřit plynopropustnost z důvodu praskání vzorku.

Tabulka 16 – Naměřená data plynopropustnosti pro odpadní PE

Vzorek	Tloušťka l [mm]	GTR [mol/m ² ·s·Pa]	Permeační koeficient P_e [mol/m·s·Pa]
Odpadní PE	0,4	$1,21 \cdot 10^{-12}$	$4,79 \cdot 10^{-16}$
PE + T 70:30	0,35	$7,44 \cdot 10^{-10}$	$2,61 \cdot 10^{-13}$
PE + T 50:50	0,35	$3,32 \cdot 10^{-11}$	$1,16 \cdot 10^{-14}$

7.6.2 Polyethylen Dowlex 2631.10 UE

U polyethylenu Dowlex obsahující odpadní tetrapak se nepodařila naměřit plynopropustnost u žádné z připravených koncentrací. Nemožnost naměřit plynopropustnost je způsobena mikroskopickými trhlinami v heterogenním materiálu a nestejnou tloušťkou připravených vzorků.

Tabulka 17 – Naměřená data plynopropustnosti pro PE Dowlex

Vzorek	Tloušťka l [mm]	GTR [mol/m ² ·s·Pa]	Permeační koeficient P_e [mol/m·s·Pa]
PE Dowlex	0,35	$1,15 \cdot 10^{-12}$	$4,03 \cdot 10^{-16}$

7.6.3 Plazmově modifikovaný polyetylen Dowlex 2631.10 UE

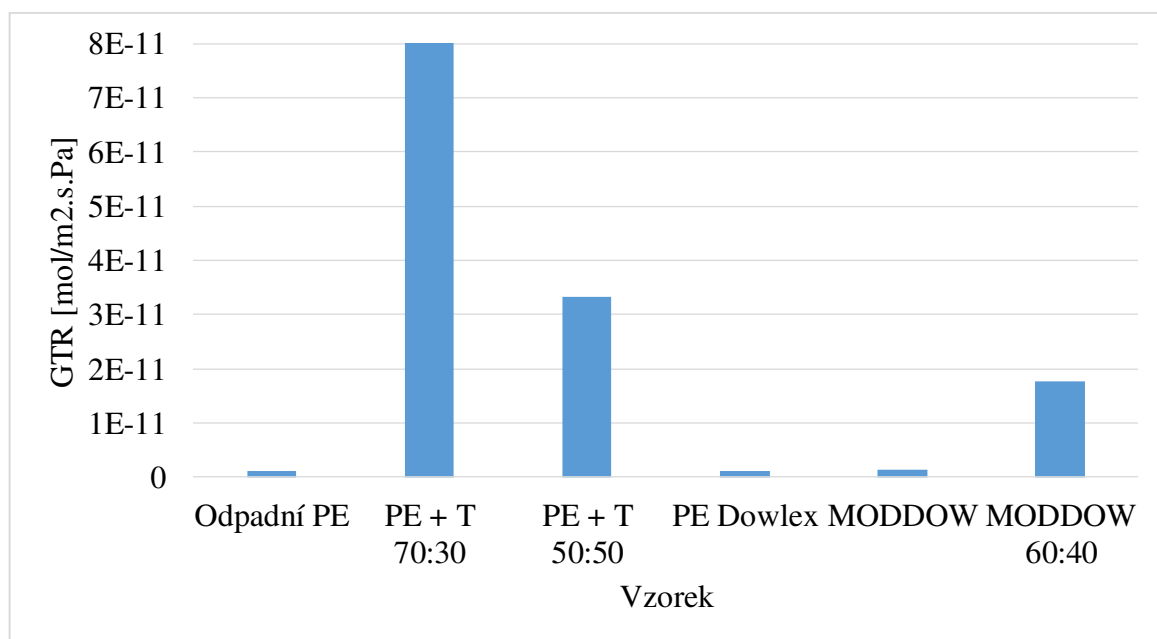
U plazmově modifikovaného PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak se podařila naměřit pouze směs obsahující 40 % odpadního tetrapaku. U směsí obsahující 30 % a 50 % odpadního tetrapaku se plynopropustnost nepodařila naměřit z důvodu mikroskopických trhlin v heterogenním materiálu.

Tabulka 18 – Naměřená data plynopropustnosti pro upravený PE Dowlex

Vzorek	Tloušťka l [mm]	GTR [mol/m ² ·s·Pa]	Permeační koeficient P_e [mol/m·s·Pa]
MODDOW	0,25	$1,44 \cdot 10^{-12}$	$3,60 \cdot 10^{-16}$
MODDOW 60:40	0,35	$1,78 \cdot 10^{-11}$	$6,21 \cdot 10^{-15}$

7.6.4 Odpadní polypropylen s obsahem skelných vláken

U odpadního polypropylenu obsahující skelná vlákna a odpadní tetrapak se nepodařila naměřit plynopropustnost u žádné z připravených koncentrací, rovněž jako u PE Dowlex 2631.10 UE. Nemožnost naměřit plynopropustnost je způsobena trhlinami v heterogenním materiálu a nestejnou tloušťkou připravených vzorků.



Graf 5 – Zobrazení GTR pro jednotlivé vzorky

8 VÝSLEDKY

Tahová zkouška

Tahová zkouška u odpadního PE obsahující odpadní tetrapak prokázala nárůst jak pevnosti v tahu, tak modulu pružnosti s rostoucím obsahem tetrapaku u vybraných materiálů. U směsi PE+T 70:30 byla pevnost v tahu 6,2 MPa a modul pružnosti 223,3 MPa. U směsi PE+T 50:50 došlo k nárůstu pevnosti v tahu až na 9,7 MPa a modulu pružnosti až na 418,5 MPa.

U PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak nedošlo k rapidnímu nárůstu pevnosti v tahu ani modulu pružnosti viz Tabulka 9. Avšak k nepatrnému nárůstu modulu pružnosti došlo, neboť směs DOW+T 70:30 měla modul pružnosti 559,4 MPa a směs DOW+T 50:50 měla modul pružnosti 629,2 MPa.

U plazmově upraveného PE Dowlex došlo k nárůstu pevnosti v tahu i modulu pružnosti. U směsi MDOW+T 70:30 byla pevnost v tahu 12,1 MPa a modul pružnosti 544,7 MPa a u směsi MDOW+T 50:50 byla pevnost v tahu 12,8 MPa a modul pružnosti 625,8 MPa. Došlo tedy ke zlepšení pevnosti v tahu o 0,7 MPa a modulu pružnosti o 81,1 MPa.

Jako poslední směs u metody tahová zkouška byla testována směs obsahující odpadní PP obsahující skelná vlákna a odpadní tetrapak. Sekaná skelná vlákna jsou do materiálů přidávána z důvodu vylepšení mechanických vlastností. Zde bylo u směsi PPGF+T 60:40 sledováno výrazné zvýšení pevnosti v tahu i modulu pružnosti než u ostatních testovaných směsí stejného druhu. U PPGF+T 70:30 nebo u směsi PPGF+T 50:50 došlo k dosažení poměrně stejných hodnot viz Tabulka 11, kdy u směsi PPGF+T 70:30 byla pevnost v tahu 5,2 MPa a modul pružnosti 490,1 MPa a u směsi PPGF+T 50:50 byla pevnost v tahu 5,4 MPa a modul pružnosti 487,7 MPa. Avšak u směsi PPGF+T 60:40 bylo dosaženo pevnosti v tahu 8,5 MPa a modul pružnosti byl 690,6 MPa. K záměně vzorků nedošlo, neboť byly vysekávány separátně a ihned uskladněny v uzavíratelných sáčkách. Můžeme se tedy domnívat, že tato koncentrace je nejlépe vhodná pro daný materiál (odpadní PP) a tedy nabízí materiálu vhodné mechanické vlastnosti. Průběh tahových zkoušek viz 7.1 Tahová zkouška.

Reologie

Reologie ukázala odlišné chování odpadního tetrapaku v použitých polymerních materiálech. V případě odpadního polyethylenu bylo zjištěno, že obsah odpadního tetrapaku snižuje viskozitu. Tedy s rostoucím obsahem odpadního tetrapaku dochází k poklesu viskozity viz Graf 1. Počáteční zdánlivá viskozita směsi obsahující 30 hmot. % je 7601,8 Pa·s, avšak u směsi obsahující 50 hmot. % je počáteční zdánlivá viskozita směsi 4637,3 Pa·s.

V případě PE Dowlex tento trend již není. Zde v případě směsi 70:30 a směsi 60:40 vidíme, že s rostoucím obsahem tetrapaku viskozita klesá, avšak v případě směsi 50:50 je viskozita materiálu v úvodu měření srovnatelná s viskozitou materiálu 70:30, je zde však patrný větší pokles viskozity během měření viz Graf 2.

U plazmově upraveného PE Dowlex nastal případ, kdy tetrapak nepůsobí jako lubrikant, nýbrž jako inhibitor tečení. U tohoto materiálu dochází s rostoucím obsahem tetrapaku k nárůstu viskozity. Takový byl i prvotní předpoklad před měřením reologických vlastností polymerních materiálů, neboť se předpokládalo, že hliník způsobuje výrazné zvýšení viskozity, tedy odporu proti tečení. Je zde patrné, že jelikož jde o stejný polymerní materiál, PE Dowlex, ale plazmově upravený, tak výsledné tokové vlastnosti jsou odlišné. Počáteční zdánlivá viskozita směsi 70:30 je 2128,4 Pa·s, avšak u směsi 50:50 je 6429,3 Pa·s. Došlo tedy k trojnásobnému zvýšení viskozity viz Graf 3.

V případě odpadního polypropylenu nastal obdobný případ jako u upraveného PE Dowlex. Tetrapak zde působí jako inhibitor tečení a dochází s rostoucím obsahem tetrapaku k nárůstu zdánlivé viskozity. U směsi 70:30 byla počáteční zdánlivá viskozita 2080,9 Pa·s, avšak u směsi 60:40 byla počáteční zdánlivá viskozita 3196,1 Pa·s. U směsi 50:50 došlo k mírnému poklesu počáteční viskozity na hodnotu 2794,7 Pa·s.

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR)

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR) u odpadního PE obsahující odpadní tetrapak prokázala, že daný materiál po vystavení zvýšené teplotě nedegraduje a nedochází ku příkladu ke tvorbě karbonylových skupin. Obdobně tomu bylo i u PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak, ale i u modifikovaného PE Dowlex obsahující odpadní tetrapak. U odpadního PP obsahující odpadní tetrapak nedošlo k žádné změně taktéž. U všech sledovaných vzorků tedy nebyl sledován rozdíl mezi referenčním vzorkem a vzorkem, který byl vystaven teplotě 80 °C po dobu 6 hodin v laboratorní sušárně Binder.

Můžeme se tedy domnívat, že odpadní tetrapak se jeví jako plnivo vhodné jak pro odpadní materiály, tak pro čisté polymerní materiály. Naměřená spektra daných materiálů viz 7.3 Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR).

Mikroskopie

Pomocí mikroskopie bylo nahlédnuto do tajů odpadních materiálů, ale i čistých polymerních materiálů obsahující odpadní tetrapak jako plnivo. Bylo sledováno, jak se odpadní tetrapak uvnitř materiálu chová a zda je vhodně rozptýlen v materiálu (zda nedochází k tvorbě aglomerátu). Bylo sledováno vhodné zaimplementování odpadního tetrapaku do všech použitých polymerních materiálů. Při obsahu 50 hmot. % odpadního tetrapaku byly vzorky obtížněji prosvětlené, neboť zvýšený obsah odpadního tetrapaku bránil průchodu světla. Záleželo však i na přípravě vzorku. Odpadní PP obsahující 16 hmot. % skelných vláken byl obtížně prosvětlen již při 30 % obsahu odpadního tetrapaku. Tento jev byl umocněn i tmavší barvou vstupního materiálu a obsahem skelných vláken, které byly pomocí mikroskopu taktéž pozorovány. Snímky jednotlivých materiálů viz kapitola 7.4 Mikroskopie.

Dynamická mechanická analýza (DMA)

Měření pomocí dynamické mechanické analýzy bylo provedeno u všech vyrobených směsí a prokázalo, že přídavek odpadního tetrapaku ani koncentrace plnění (30 %, 40 % a 50 %) nemají výrazný vliv na změnu vnitřní tuhosti materiálu, jak uvedené výsledky dokazují. Průběhy měření viz kapitola 7.5 Dynamická mechanická analýza.

Propustnost pro plyny

Měření plynopropustnosti bylo provedeno u všech vyrobených směsí a bylo zjištěno, že přídavek odpadního tetrapaku zvyšuje plynopropustnost, neboť vzniká heterogenní materiál, ve kterém vzniknou slabá místa, která mají za následek velkou plynopropustnost. Z tohoto důvodu se nepodařilo některé vzorky naměřit. U odpadního tetrapaku bylo naměřeno GTR $1,21 \cdot 10^{-12}$ mol/m²·s·Pa, u PE Dowlex $1,15 \cdot 10^{-12}$ mol/m²·s·Pa a u modifikovaného PE Dowlex $1,44 \cdot 10^{-12}$ mol/m²·s·Pa. Z čistých materiálů má PE Dowlex nejnižší plynopropustnost. Naopak největší plynopropustnost z naměřených směsí má odpadní PE obsahující 30 hmot. % odpadního tetrapaku, který má GTR $7,44 \cdot 10^{-10}$ mol/m²·s·Pa viz Graf 5. Můžeme říci, že měření plynopropustnosti u takto heterogenního materiálu je velmi náhodné, velmi záleží na přípravě vzorků a na vhodném vyseknutí

vzorku z vylisované fólie. U odpadního PE se podařilo naměřit u směsi obsahující 30 hmot. % velkou plynopropustnost, u směsi obsahující 40 hmot. % se nepodařilo naměřit plynopropustnost z důvodu prasknutí vzorku a u směsi obsahující 50 hmot. % se podařilo naměřit plynopropustnost menší, než u směsi obsahující 30 hmot. % odpadního tetrapaku.

Odpadní tetrapak tedy jako plnivo zvyšuje plynopropustnost, tudíž je vhodný zejména jako plnivo do materiálů určených k dekorativním účelům v exteriéru a interiéru, popřípadě k výrobě ochranných desek městského mobiliáře (opláštění vnější kostry odpadkových košů) nebo k výrobě předmětů, kde plynopropustnost nenarušuje aplikační potenciál. Materiál plněný odpadním tetrapakem může tedy nalézt další uplatnění například jako organizér drogistického zboží, zásobník na papírové ubrousky do koupelen či zdravotnického zařízení nebo jako obal na brýle. Naopak materiál plněný odpadním tetrapakem není vhodný využívat tam, kde je žádoucí, aby materiál plnil bariérové vlastnosti, tedy zejména v obalovém průmyslu. Více viz kapitola 7.6 Propustnost pro plyny.

9 ZÁVĚR

Diplomová práce popisuje zpracování odpadního tetrapaku do odpadních, ale i čistých polymerních materiálů. Cílem praktické části bylo zpracovat odpadní tetrapak tak, aby se dal vhodně dávkovat, připravit směsi obsahující polymerní materiál a odpadní tetrapak v poměrech 70:30, 60:40 a 50:50 a na takto připravených směsích sledovat, jak daná modifikace ovlivňuje fyzikální a reologické vlastnosti.

Teoretická část je zaměřena na tři studované problematiky, a to úpravu a zpracování plastového odpadu, metody recyklace odpadního tetrapaku. Dále se zabývá potenciálně vhodnými materiály, které by bylo vhodné použít pro přípravu směsí. Velká část práce je věnována popisu metod, které sloužily k vyhodnocení fyzikálních a reologických vlastností. Praktická část popisuje výrobní zkoušku, která prokázala možnost zakomponování odpadního drceného hliníku do polyethylenu pomocí kompaundační planetární linky. Dále výrobní zkoušky prokázaly možnost vytlačování směsí obsahující až 50 hmot. % odpadního tetrapaku. Testování mechanických, ale i reologických vlastností prokázalo různé chování polymerních materiálů, např. u polyethylenu Dowlex bylo zjištěno, že neupravený polyethylen Dowlex má jiné vlastnosti než plazmově upravený polyethylen Dowlex. Polyethylen Dowlex má pevnost v tahu 14,8 MPa a modul pružnosti 408,4 MPa, kdežto modifikovaný polyethylen Dowlex má pevnost v tahu 15,3 MPa a modul pružnosti 399,7 MPa. U metody DMA bylo zjištěno, že odpadní tetrapak nemá vliv na vnitřní tuhost materiálu a u měření plynopropustnosti bylo zjištěno, že odpadní tetrapak zvyšuje plynopropustnost materiálu.

Praktickou činností recyklačních firem v České republice ale i ve světě je potvrzeno, že po rozvláknění obalového materiálu Tetrapak je papírové vlákno snadno recyklováno. Avšak zbývající produkt obsahující LDPE a hliník nelze odseparovat na jednotlivé složky, tudíž je tento zbývající produkt využíván k energetickému využití či výrobě desek. Díky úpravě pomocí kompaundační planetární linky a zakomponování do polymerního materiálu by se mělo dosáhnout toho, aby nedocházelo ke spalování odpadní polyethylenu obsahující hliník a vznikaly produkty, které svou aplikací nahradí materiály, které se můžou využít k jiným účelům a zároveň daný výrobek zlevní, jelikož se jedná o plně recyklovaný materiál. Takové materiály by mohly naleznout uplatnění v doplňcích interiérů rodinných domů, zejména koupelen, nebo k výrobě ochranných desek městského mobiliáře. Můžeme tedy říci, že by nedocházelo ke snižování objemu ropy na planetě a k navyšování uhlíkové stopy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOPKA, T.: Ecoservis - komplexní nakládání s odpady s.r.o., Liberec [online]. [cit. 2020-09-26]. Dostupné z: <https://www.ecoservis.eu>
- [2] Puruplast a.s., Kostelany nad Moravou [online]. [cit. 2020-09-26].
Dostupné z: <https://www.puruplast.cz>
- [3] Co je to recyklace? [online]. 2020 [cit. 2020-09-29].
Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/>
- [4] Ministerstvo průmyslu a obchodu. Definice druhotné suroviny: výňatek ze zákona o odpadech [online]. 2016 [cit. 2020-10-25].
Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/politika-druhotnych-surovin-cr/2016/12/Priloha-3_Definice-Druhotna-surovina.pdf
- [5] SLOBODIAN, P.: Recyklace a likvidace tuhých odpadů, skripta, Zlín, 2013
- [6] SEDLÁŘ O., NAVRÁTIL B., KADLEC J.: Pryže a plasty jako druhotné suroviny. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] HSU, K.: Techgene Machinery Co., Ltd.: Taiwan [online]. 2020 [cit. 2020-10-26].
Dostupné z: <https://www.techgene.com.tw/cs/index.html>
- [8] ROGOFF, M. J., SCREVE F.: Waste-to-Energy: Technology and Project Information, Third Edition, 2019
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816079-4.00004-9>
- [9] Marius Pedersen a.s.: Třídící linka [online]. [cit. 2020-10-30].
Dostupné z: www.mariuspedersen.cz
- [10] Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů: Přípravné zpracování plastů [online]. [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz>
- [11] ANASTASSAKIS, G. N.: Handbook of Environmental Engineering: Solid Waste Separation and Processing: Principles and Equipment School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece, 2018, p. 627 – 671
DOI: 10.1002/9781119304418

- [12] 1.Plastcompany s.r.o., Plastics Machinery, Brno [online]. [cit. 2020-11-08].
Dostupné z: <https://1plastcompany.cz>
- [13] DUCHÁČEK, V.: Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vydání, VŠCHT v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [14] AUSPERGER, A.: Technologie zpracování plastů, Svitavy, 2016
ISBN 978-80-88058-77-9
- [15] OSTŘANSKÁ L.: Problematika odstraňování nečistot v linkách pro zpracování sběrového papíru, Disertační práce, VŠB – TU Ostrava, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2010, str. 88, 1 příloha.
- [16] APPITA: Technology of pulping and paper making, Australia & New Zealand [online], 2015 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z:
https://appita.com/images/training/Glossary_papermaking_terms_used.pdf
- [17] GEORGIOPOULOU, L., PAPPAS, G. D., VOUYIOUKA, S.N., MAGOULAS, K.:
Recycling of post-consumer multilayer Tetra Pak® packaging with the Selective Dissolution-Precipitation process. Athens, February 2021, ISSN 0921-3449.
DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105268
- [18] KOPČILOVÁ M., HOFFMANN J., JULINOVÁ M.: Lahvové testy kompostovatelných plastů. *Waste Forum* [online]. 2009, vol. 2, [cit. 2020-11-30].
Dostupné z: http://www.wasteforum.cz/cisla/WF_1_2009.pdf
ISSN 1804-0195
- [19] Služby města Jihlavy – Kompostárna Henčov [online]. [cit. 2020-11-30].
Dostupné z: <https://www.smj.cz>
- [20] Flexibau s.r.o.: Desky PACKWALL - recyklace nápojových kartonů [online]. 2019 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <http://www.packwall.cz>
- [21] VEDROVÁ, V.: Barva a její významy, Bakalářská práce, Masarykova univerzita, Fakulta pedagogická, Katedra výtvarné výchovy, Brno 2008.
- [22] MMCITÉ 1 a.s., Výrobce městského mobiliáře, Bílovice
Dostupné z: <https://www.mmcite.com>
- [23] RAUSING, H. Pack for liquids. Sweden. Patent number: 4998668, March 12, 1991.

- [24] Tetra Pak [online]. [cit. 2021-01-22]. Dostupné z: <https://www.tetrapak.com>
- [25] Papcel – nápojové kartony [online]. [cit.2021-01-23].
Dostupné z: <https://www.papcel.cz/produkty/specialni/napojove-obaly/>
- [26] SELKE, S. E. M., CULTER J. D., HERNANDEZ R. J.: *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications and Regulations.*, 2nd Edition, Hanser Publishers, Munich, 2004.
ISBN 1-56990-372-7.
- [27] LOYDA M., ŠPONER V., ONDRÁČEK L., BAREŠ A.: *Svařování termoplastů. II. doplněné a rozšířené vydání.* Praha: UNO Praha spol., 2011.
ISBN 978-80-904949-0-9
- [28] SWEETING, Orville J.: *The Science and Technology of Polymer Films. Volume II.* Yale University, 1971.
ISBN 0 471 83894 2.
- [29] Sigma-Aldrich Corporation [online]. [cit. 2021-01-30].
Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com>
- [30] SIKORA A., HORÁK Z., FORTELNÝ I., HLAVATÁ D., KOLAŘÍK J.: *Polymerní směsi. Komerčně významné typy.* *Plasty a kaučuk*, 2006, sv. 43, 1. – 2. vydání, s. 15 – 18, ISSN 0322-7340
- [31] DOW – The Dow Chemical Company, Safety Data Sheet and Technical Information
Product name: DOWLEX™ 2631UE Polyethylen Resin
- [32] FTP Plastics s.r.o.: *Polypropylen a jeho typy* [online]. [cit. 2021-02-02].
Dostupné z: <https://www.ftpplastics.cz/>
- [33] RAUWENDAAL, CH.: *Polymer Extrusion*, 5th Edition, Hanser Publishers, 2014
ISBN 978-1-56990-516-6, Electronic ISBN 978-1-5231-0127-6
- [34] KUTA, A: *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*, 1. vydání, Praha, Vydavatelství VŠCHT, 1999, 203 stran, ISBN 80-708-0387-3
- [35] KREBS, S.: *Technologie zpracování plastů a kompozitů*, Ústav strojírenské technologie, ČVUT v Praze [online]. [cit. 2021-02-20].

- Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/116/Pedmt-2331507-c-3-2016-03-08.pdf>
- [36] ZATLOUKAL, M.: Aplikovaná reologie, Přednášky 2019, Fakulta technologická, UTB ve Zlíně
- [37] MANAS-ZLOCZOWER, I.: Mixing and compounding of polymers: Theory and Practise, 2nd Revised Edition, Munich Hanser Publishers, 2009, pages: 1163
ISBN 978-1-56990-424-4
- [38] SEIDL, M.: Stroje pro zpracování polymerních materiálů, Svitavy, 2016
ISBN 978-80-88058-71-7
- [39] BĚHÁLEK, L.: Polymery, Svitavy, 2016
ISBN 978-80-88058-68-7
- [40] Statické zkoušky krátkodobé , Tahové zkoušky, Kontrolní a zkušební metody, studijní texty, Fakulta technologická, UTB ve Zlíně [online].[cit. 2021-02-26].
Dostupné z: <http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=kzm>
- [41] Fyzika polymerů, Tokové chování polymerních tavenin a Měření tokových vlastností, Fakulta technologická, UTB ve Zlíně [online].[cit. 2021-02-26].
Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_02.pdf
http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_05.pdf
- [42] SÝKOROVÁ, L., KNEDLOVÁ, J., MĚŘÍNSKÁ, D., PATA V.: Comparison of quantitative changes after passing the laser beam through polymeric material. In: 9th International Conference on Manufacturing Science and Education (MSE 2019): Trends in New Industrial Revolution, Sibiu: E D P Sciences, 2019
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929003007>
- [43] Infračervená spektroskopie a její techniky – studijní materiál, VŠCHT v Praze [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm>
- [44] American Laboratory Trading, Nicolet Avatar 320 FT-IR Spectrometer [online]. [cit. 2021-02-28]. Dostupné z: https://americanlaboratorytrading.com/lab-equipment-products/nicolet-avatar-320-ft-ir-spectrometer_11374

- [45] KARASOVÁ, A., NISTOR, A.: Optická (světelná) mikroskopie, Fakulta chemicko-inženýrská, VŠCHT v Praze
Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/8_cFAA.pdf?redirected
- [46] Základy mikroskopie – návod k laboratornímu cvičení z Fyziky, Fakulta technologická, UTB ve Zlíně [online]. [cit. 2021-03-01].
Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_2/F2_lab_10.pdf
- [47] VANÍČEK, J.: Metody termické analýzy, Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci, 2007, Dostupné z:
<https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/49431/%5B16%5D.pdf?sequen>
- [48] KUTA, A., HRDLIČKA, Z.: Dynamický mechanický analyzátor DMA, Ústav polymerů, VŠCHT v Praze, 2020
Dostupné z: <https://pol.vscht.cz/vyzkum/vybaveni/mechanicke>
- [49] METTLER-TOLEDO Pte Ltd.: Dynamic Mechanical Analyzer (DMA), Singapore [online]. [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.mt.com/>
- [50] McKEEN, L.W.: Permeability Properties of Plastics and Elastomers, 3rd Edition, 2011 ISBN 9781437734706, eBook ISBN 9781437734706
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3469-0.10001-3>
- [51] KONEČNÝ, P.: Měření plynopropustnosti polymerů metodou konstantního objemu, Plasty a kaučuk, 2009, 46 svazek, 11-12 vydání, s. 324-327. ISSN 0322-7340
- [52] ŠVEC, J.: Vlastní zdroj
- [53] SurfaceTreat a.s., Turnov, Česká republika [online]. [cit. 2021-03-22].
Dostupné z: <http://surfacetreat.cz/>
- [54] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická, přístrojové vybavení [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z:
<https://ft.utb.cz/ustav-inzenyrstvi-polymeru/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Např.	Například
Apod.	A podobně
Tzv.	Tak zvané
EU	Evropská unie
CO ₂	Oxid uhličitý
H ₂ O	Voda
pH	Vodíkový exponent, též potenciál vodíku (Potential of Hydrogen)
PE	Polyethylen (Polyethylene)
LDPE	Lineární nízkohustotní polyethylen (Low Density Polyethylene)
HDPE	Vysokohustotní polyethylen (High Density Polyethylene)
\bar{M}_w	Průměrná hmotnostně střední molární hmotnost
ICI	Imperial Chemical Industries
PP	Polypropylen (Polypropylene)
ITT	Index toku taveniny
MFI	Melt flow index
PP-H	Homopolymer polypropylenu
PP-B	Blokový kopolymer polypropylenu
PP-R	Náhodný kopolymer polypropylenu
UV záření	Ultrafialové záření (ultraviolet)
°C	Stupeň Celsia
K	Kelvin
PVC	Polyvinylchlorid
Resp.	Respektive
Tj.	To je, tj.
Hmot.	Hmotnostních

IR	Infračervené (InfraRed)
KBr	Bromid draselný
NaCl	Chlorid sodný
CHCl ₃	Chloroform
CCl ₄	Tetrachlormetan
PC	Osobní počítač (Personal computer)
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
DMA	Dynamická mechanická analýza
ČSN	Česká technická norma
PET	Polyethylentereftalát
PE + T	Odpadní polyethylen a odpadní tetrapak
DOW + T	Polyethylen Dowlex a odpadní tetrapak
MODDOW	Modifikovaný polyethylen Dowlex
PPGF	Odpadní polypropylen obsahující skelná vlákna

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Horizontální lisovací stroj

Obrázek 2 – Vertikální lisovací stroj

Obrázek 3 – Třídící linka

Obrázek 4 – Kladivový mlýn

Obrázek 5 – Talířový mlýn

Obrázek 6 – Shredder

Obrázek 7 – Nožový mlýn

Obrázek 8 – Vibrační třídič

Obrázek 9 – Pásový granulátor

Obrázek 10 – Granulace za studena

Obrázek 11 – Granulace za tepla

Obrázek 12 – Rozvlákňovač

Obrázek 13 – Rozvlákňování tetrapaku

Obrázek 14 – Kompostárna

Obrázek 15 – Rotační síto

Obrázek 16 – Deska PACKWALL

Obrázek 17 – Opláštění vnější kostry odpadkového koše

Obrázek 18 – Balení pro tekutiny

Obrázek 19 – Ukázka struktury aseptického a neaseptického nápojového kartonu

Obrázek 20 – Vzorec PE

Obrázek 21 – Označení nízkohustotního polyethylenu

Obrázek 22 – Označení vysokohustotního polyethylenu

Obrázek 23 – Vzorec PP

Obrázek 24 – Detail šneku uvnitř vytlačovacího stroje

Obrázek 25 – Vytlačovací stroj

- Obrázek 26 – Disperzní míchací element
- Obrázek 27 – Distributivní míchací element
- Obrázek 28 – Uspořádání šneků, stejnoběžné (vlevo), protiběžné (vpravo)
- Obrázek 29 – Tvary zkušebních těles
- Obrázek 30 – Obecná deformační (tahová) křivka
- Obrázek 31 – Model reologického chování během smykového namáhání
- Obrázek 32 – Toková křivka polymerních látek
- Obrázek 33 – Schéma kapilárního reometru
- Obrázek 34 – Rychlostní profily polymerních tavenin
- Obrázek 35 – Spektrometr Nicolet Avatar 320 FT-IR
- Obrázek 36 – Biologický mikroskop
- Obrázek 37 – Přístroj DMA
- Obrázek 38 – Schéma měřícího zařízení metodou konstantního objemu
- Obrázek 39 – Nárůst plynu v nízkotlaké komoře
- Obrázek 40 – Platex Planetary Extruder
- Obrázek 41 – Odpadní tetrapak
- Obrázek 42 – Chlazení vyrobeného materiálu
- Obrázek 43 – Nožový mlýn Moretto
- Obrázek 44 – Odpadní PE ve tvaru „čočky“
- Obrázek 45 – Porovnání smáčivosti PE prášku
- Obrázek 46 – Plastikářský laboratorní hnětič Brabender
- Obrázek 47 – Ruční laboratorní lis
- Obrázek 48 – Hydraulický laboratorní lis
- Obrázek 49 – Odpadní PE s odpadním tetrapakem
- Obrázek 50 – Neupravený PE Dowlex s odpadním tetrapakem
- Obrázek 51 – Upravený PE Dowlex s odpadním tetrapakem

Obrázek 52 – Odpadní PP obsahující skelná vlákna s odpadním tetrapakem

Obrázek 53 – Průběh tahové zkoušky odpadního PE a odpadního tetrapaku

Obrázek 54 – Průběh tahové zkoušky PE Dowlex a odpadního tetrapaku

Obrázek 55 – Průběh tahové zkoušky mPE Dowlex a odpadního tetrapaku

Obrázek 56 – Průběh tahové zkoušky odpadního PP a odpadního tetrapaku

Obrázek 57 – Připravené vzorky do laboratorní sušárny Binder

Obrázek 58 – Naměřené spektrum odpadního PE a odpadního tetrapaku v poměru 70:30

Obrázek 59 – Naměřené spektrum odpadního PE a odpadního tetrapaku v poměru 60:40

Obrázek 60 – Naměřené spektrum odpadního PE a odpadního tetrapaku v poměru 50:50

Obrázek 61 – Naměřené spektrum PE Dowlex a odpadního tetrapaku v poměru 70:30

Obrázek 62 – Naměřené spektrum PE Dowlex a odpadního tetrapaku v poměru 60:40

Obrázek 63 – Naměřené spektrum PE Dowlex a odpadního tetrapaku v poměru 50:50

Obrázek 64 – Naměřené spektrum upraveného PE a odpadního tetrapaku v poměru 70:30

Obrázek 65 – Naměřené spektrum upraveného PE a odpadního tetrapaku v poměru 60:40

Obrázek 66 – Naměřené spektrum upraveného PE a odpadního tetrapaku v poměru 50:50

Obrázek 67 – Naměřené spektrum odpadního PP a odpadního tetrapaku v poměru 70:30

Obrázek 68 – Naměřené spektrum odpadního PP a odpadního tetrapaku v poměru 60:40

Obrázek 69 – Naměřené spektrum odpadního PP a odpadního tetrapaku v poměru 50:50

Obrázek 70 – Odpadní PE a odpadní tetrapak v poměru 70:30

Obrázek 71 – Odpadní PE a odpadní tetrapak v poměru 60:40

Obrázek 72 – Odpadní PE a odpadní tetrapak v poměru 50:50

Obrázek 73 – PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 70:30

Obrázek 74 – PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 60:40

Obrázek 75 – PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 50:50

Obrázek 76 – Upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 70:30

Obrázek 77 – Upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 60:40

Obrázek 78 – Upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak v poměru 50:50

Obrázek 79 – Odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 70:30

Obrázek 80 – Odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 60:40

Obrázek 81 – Odpadní PP a odpadní tetrapak v poměru 50:50

Obrázek 82 – Průběh měření pro odpadní PE

Obrázek 83 – Průběh měření pro odpadní PE a odpadní tetrapak 70:30

Obrázek 84 – Průběh měření pro čistý upravený PE Dowlex

Obrázek 85 – Průběh měření pro upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak 70:30

Obrázek 86 – Průběh měření pro upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak 60:40

Obrázek 87 – Průběh měření pro upravený PE Dowlex a odpadní tetrapak 50:50

Obrázek 88 – Průběh měření plněného a čistého PE

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Porovnání různých druhů nezesíťovaných polyethylenů

Tabulka 2 – Vlastnosti LDPE

Tabulka 3 – Vlastnosti HDPE

Tabulka 4 – Vlastnosti polyethylenu Dowlex 2631.10UE

Tabulka 5 – Vlastnosti PP

Tabulka 6 – Základní vlastnosti jednotlivých stereoizomerů polypropylenu

Tabulka 7 – Index Nenevtonského chování

Tabulka 8 – Pevnost v tahu a modul pružnosti odpadního PE a odpadního tetrapaku

Tabulka 9 – Pevnost v tahu a modul pružnosti PE Dowlex a odpadního tetrapaku

Tabulka 10 – Pevnost v tahu a modul pružnosti mPE Dowlex a odpadního tetrapaku

Tabulka 11 – Pevnost v tahu a modul pružnosti odpadního PP a odpadního tetrapaku

Tabulka 12 – Naměřená data odpadního polyethylenu

Tabulka 13 – Naměřená data polyethylenu Dowlex

Tabulka 14 – Naměřená data plazmově upraveného polyethylenu Dowlex

Tabulka 15 – Naměřená data odpadního polypropylenu obsahující skelná vlákna

Tabulka 16 – Naměřená data plynopropustnosti pro odpadní PE

Tabulka 17 – Naměřená data plynopropustnosti pro PE Dowlex

Tabulka 18 – Naměřená data plynopropustnosti pro upravený PE Dowlex

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro odpadní PE

Graf 2 – Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro PE Dowlex

Graf 3 – Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro upravený PE Dowlex

Graf 4 – Závislost zdánlivé viskozity na smykové rychlosti pro odpadní PP

Graf 5 – Zobrazení GTR pro jednotlivé vzorky

