

# Vliv přídavku recyklátu na vlastnosti HD-PE a PET

Jolana Filipčíková

---

Bakalářská práce  
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická  
Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jolana Filipčíková**  
Osobní číslo: **T19014**  
Studijní program: **B0711A130009 Materiály a technologie**  
Specializace: **Polymerní materiály a technologie**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Vliv přídavku recyklátu na vlastnosti HD-PE a PET**

## Zásady pro vypracování

Cílem práce bude vyhodnotit zpracovatelské, mechanické a jiné fyzikální vlastnosti „post consumer“ recyklátu PET a HD-PE a směsi recyklátu s panenským materiálem s obsahem 30 % recyklátu. Toto je podíl, který by se měl přidávat do jednorázových obalů do roku 2030 (25 % do roku 2025). Součástí práce bude příprava drtě recyklátu a jeho třídění a čištění. Následně se vyrobí fólie či tělíka z čistého recyklátu a ze směsí, které pak budou charakterizovány pomocí mechanických zkoušek, diferenciální snímací kalorimetrie a spektrofotometrie. Testována bude také plynopropustnost či reologické vlastnosti.

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

Seznam doporučené literatury:

1. Scheirs, John. Polymer recycling: science, technology and applications. Chichester: John Wiley, 1998 1st ed., ISBN 0471970549.
2. Worrell, Ernst, Reuter, M. A. Handbook of recycling : state-of-the-art for practitioners, analysts, and scientists. Amsterdam: Elsevier, 2014, ISBN 9780123964595.
3. Kumar Thakur, Vijay. Recycled Polymers: Properties and Applications. Smithers Rapra, 2015, ISBN 9781910242308.
4. Goodship, Vanessa. Introduction to plastics recycling. Shrewsbury: Smithers Rapra Technology, 2007, 2nd ed., ISBN 9781847350855.
5. Letcher, Trevor. Plastic Waste and Recycling, 1st Ed., Academic Presss, ISBN 9780128178805.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.**  
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **1. února 2022**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2022**

L.S.

---

**prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D.**  
děkan

---

**Ing. Jana Navrátilová, Ph.D.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 1. dubna 2022

# PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

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

## Prohlašuji,

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

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....  
podpis studenta

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem recyklátu z odpadních nápojových lahví na vlastnosti panenských materiálů. Jedná se o polyethylentereftalát (PET) (tělo láhve) a vysokohustotní polyetylen (HD-PE) (víčka). Byly připraveny 100% recykláty uvedených materiálů a směsi s přídavkem 30 % recyklátu do panenského materiálu. Studován byl také recyklát celé láhve, tedy PET+HD-PE+PP, přičemž polypropylen (PP) byl zastoupen v podobě etiket. Na připravených recyklátech, směsích a panenských materiálech byly sledovány různé vlastnosti, a to reologické, mechanické, tepelné a morfologické. Bylo zjištěno, že recykláty vykazují mírné zhoršení studovaných vlastností, avšak přídavek 30 % recyklátu do panenského materiálu nijak zásadně nezhoršuje jeho vlastnosti. Recyklát celé láhve (tedy směs materiálů) vykazoval podobné vlastnosti jako recyklát PET.

Klíčová slova: recyklace, PET, HD-PE

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with an impact of addition of recycled plastic bottles to properties of virgin material. The material is polyethylenterephthalate (PET) (body of bottle) and high density polyethylene (HD-PE) (bottle cup). They were prepared 100% recyclates of these materials and their mixtures with 30% of virgin material. It was studied also a recyclate of the whole bottle, PET+HD-PE+PP, in which PP was covered in etiquette. On prepared recyclates, mixtures and virgin materials were observed different properties like rheological, mechanical, temperature and morphological properties. It was observed, that recyclates show a little degradation of properties and the 30% addition of recyclate to virgin material doesn't decrease its properties significantly. Recyclate of the whole bottle (the mixture of materials) showed similar properties as PET recyclate.

Keywords: recycling, PET, HD-PE

Především bych chtěla poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Ing. Janě Navrátilové, Ph.D. za její ochotu a trpělivost. Dále bych chtěla poděkovat svým rodičům za podporu při studiu.

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

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 POLYMERY</b> .....	<b>11</b>
1.1 POLYETYLENTEREFTALÁT .....	11
1.2 POLYPROPYLEN .....	12
1.3 POLYETYLEN .....	12
1.3.1 Vysoko-hustotní polyetylen .....	13
1.3.2 Nízko-hustotní polyetylen .....	14
1.3.3 Lineární nízko-hustotní polyetylen .....	14
<b>2 RECYKLACE</b> .....	<b>15</b>
2.1 PRIMÁRNÍ RECYKLACE .....	15
2.2 SEKUNDÁRNÍ RECYKLACE (MECHANICKÁ) .....	15
2.2.1 Sesbírání materiálu a jeho třídění .....	16
2.2.2 Drcení materiálu .....	17
2.2.3 Čištění a sušení materiálu .....	17
2.2.4 Zpracování .....	17
2.2.5 Zhotovení nového produktu .....	18
2.3 TERCIÁRNÍ RECYKLACE (CHEMICKÁ) .....	18
2.3.1 Solvolýza .....	18
2.3.2 Pyrolýza .....	18
2.3.3 Gazifikace .....	19
2.4 KVARTERNÍ RECYKLACE (SPALOVÁNÍ) .....	19
2.5 RECYKLACE POLYETHYLENTEREFTALÁTU .....	19
2.5.1 Mechanická recyklace PET .....	19
2.5.2 Chemická recyklace PET .....	20
2.6 RECYKLACE POLYOLEFÍNŮ .....	20
2.6.1 Krakování .....	20
2.6.2 Výroba paliva .....	21
2.7 RECYKLACE HETEROGENNÍCH POLYMERNÍCH SMĚSÍ .....	21
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>22</b>
<b>3 PŘÍPRAVA VZORKŮ</b> .....	<b>23</b>
3.1 POUŽITÉ MATERIÁLY .....	23
3.2 DRCENÍ .....	23
3.3 ČIŠTĚNÍ A SUŠENÍ .....	23
3.4 REGRANULACE .....	24
3.5 LISOVÁNÍ DESEK .....	25
<b>4 METODY ANALÝZY</b> .....	<b>26</b>

4.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	26
4.1.1	Příprava tělísek .....	26
4.1.2	Průběh zkoušky .....	26
4.2	TOKOVÉ CHOVÁNÍ .....	26
4.2.1	Index toku taveniny .....	26
4.2.2	Toková křivka .....	27
4.3	RENTGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA .....	27
4.4	TEPELNÉ CHOVÁNÍ .....	27
4.4.1	Diferenciální snímací kalorimetrie .....	27
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>29</b>
5.1	TOKOVÉ VLASTNOSTI .....	29
5.2	TAHOVÁ ZKOUŠKA .....	30
5.2.2	Materiály HD-PE .....	33
5.3	RENGENOVÁ DIFRAKČNÍ ANALÝZA .....	35
5.4	DIFERENCIÁLNÍ SNÍMACÍ KALORIMETRIE .....	38
5.4.1	Tepelné chování materiálů PET .....	38
5.5	TERMOGRAVIMETRICKÁ ANALÝZA .....	51
5.5.1	Tepelná degradace materiálů obsahujících PET .....	51
5.5.2	Tepelná degradace materiálů obsahujících HD-PE .....	53
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>63</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>65</b>



## ÚVOD

Plasty jsou relativně nové materiály, které jsou používány v nejrůznějších aplikacích zhruba posledních 100 let. Zcela jistě v mnoha oblastech usnadňují člověku život, což je i důvod, proč jejich spotřeba v posledních dekádách rapidně narostla a lidstvo musí čelit novému problému – plastovému odpadu.

Při každé návštěvě obchodu si lze všimnout, že většina výrobků je zabalena do jednorázových plastových obalů. Polyetylen a polypropylen se k jednorázovému balení používají nejčastěji, protože mají skvělé bariérové vlastnosti, čímž brání proniknutí vzduchu do balení a následné oxidaci výrobku. Zároveň se dobře zpracovávají a jsou relativně levné. Dalším obalovým plastem, který se uplatňuje zejména u lahví, je polyethylentereftalátu.

Rozbalením obalu vzniká odpad, který zpravidla nelze dále využít. Podle evropské statistické agentury Eurostat bylo na území Evropské Unie za rok 2019 zrecyklováno pouze 41 % plastového odpadu (v ČR 61 %). Zbytek plastového odpadu skončil na komunálních skládkách. [1]

Evropská Unie se rozhodla podpořit recyklaci jednorázového plastového odpadu tím, že se každý členský stát v roce 2019 zavázal, že od roku 2025 bude do nových nápojových lahví přidávat alespoň 25 % recyklovaného plastu a od roku 2030 se počet procent zvýší na alespoň 30. [2]

Cílem této práce je srovnat vlastnosti 100% recyklátu PET a HD-PE s vlastnostmi 30% recyklátu PET a HD-PE, panenským PET a HD-PE a směsí všech materiálů, ze kterých je vyrobena nápojová láhev včetně etikety.

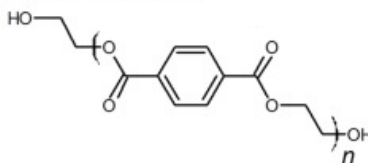
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 POLYMERY

Polymerem se rozumí makromolekulární látka složená z dlouhých řetězců makromolekul. Makromolekuly vznikají spojením mnoha monomerních jednotek, které se po zabudování do polymerního řetězce nazývají mery. Polymerní řetězec může být lineární, větvený nebo může tvořit 3-dimensionální síť. Každý polymerní materiál může mít mnoho chemických variací – různou molekulovou hmotnost, větvení, konfiguraci nebo různé mezimolekulární interakce. Velikost polymerního řetězce se může udávat buď molekulovou hmotností nebo stupněm polymerace (počtem merů v řetězci). Polymery mohou být syntetické (polyetylen a polypropylen) nebo přírodní (celulóza a proteiny). [3,4]

### 1.1 Polyethylentereftalát

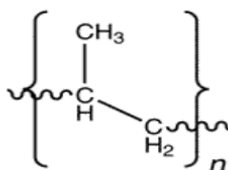
Polyethylentereftalát (Obr. 1), známý pod zkratkou PET, je jeden z nejrozšířenějších termoplastických polymerů na trhu. Řadí se do skupiny polyesterů a vzniká polykondenzací kyseliny tereftalové a ethylenglykolu. Optické vlastnosti polyethylentereftalátu závisí na stupni krystalinity – pokud je v amorfním stavu, je průhledný, pokud v semikrystalickém, je mléčně zakalený. Používá se v obalovém průmyslu zejména díky výborným bariérovým vlastnostem – nízká propustnost pro kyslík, dusík, vodík a oxid uhličitý. Mezi jeho další důležité vlastnosti patří dobrá chemická odolnost, velmi nízká navlhavost, odolnost vůči teplotě a nízká cena. Nejčastěji se používá k výrobě nápojových lahví, fólií a textilních vláken. [5]



Obr. 1: Vzorec PET [2]

## 1.2 Polypropylen

Polypropylen (Obr. 2), známý pod zkratkou PP, se řadí do skupiny polyolefinů. Vzniká radikálovou či kationtovou polymerací propylenu. Díky přítomnosti terciálního uhlíku je náchylný k oxidaci v důsledku UV záření a teploty. V závislosti na typu polymerace a jejích podmínkách, polypropylen může mít různou stereochemickou konfiguraci – izotaktickou, syndiotaktickou nebo ataktickou.



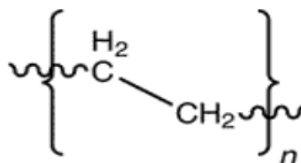
Obr. 2: Vzorec polypropylenu [4]

- **Izotaktický PP:** Vzniká za použití Ziegler-Nattových katalyzátorů a má methylové skupiny umístěné na stejné straně polymerního řetězce. Je vysoce krystalický (40–70 %) a má vyšší odolnost vůči rozpouštědlům a teplotě oproti ataktickému PP.
- **Ataktický PP:** Methylové skupiny jsou na polymerním řetězci umístěny náhodně. Průmyslové procesy jsou zpravidla navrženy tak, aby ataktického PP vznikalo co nejméně, jelikož má nízkou hodnotu a nekystalizuje. Nejčastěji je využíván jako přísada adheziv nebo plnivo do asfaltu. [4,6]
- **Syndiotaktický PP:** Vzniká za použití metallocenových katalyzátorů a jeho methylové skupiny jsou umístěny střídavě na polymerním řetězci. Oproti izotaktickému PP má nižší odolnost vůči teplotě. Krystaly syndiotaktického PP mají mnohem komplexnější strukturu než u izotaktického, což znesnadňuje jeho krystalizaci a krystalizuje velmi pomalu. [4]

## 1.3 Polyetylen

Polyetylen (Obr. 3), známý pod zkratkou PE, patří do skupiny polyolefinů. PE může být lineární nebo rozvětvený, homopolymer nebo kopolymer. Rozlišuje se několik druhů PE v závislosti na hustotě, molekulové hmotnosti nebo větvení. Hlavní tři typy se rozlišují podle hustoty: vysoko-hustotní polyetylen (HDPE), nízko-hustotní polyetylen (LDPE) a lineární nízko-hustotní polyetylen (LLDPE). S rostoucí krystalinitou polyetylenu roste i jeho

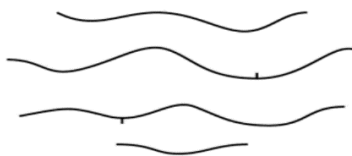
chemická odolnost. Za normálních podmínek je PE odolný vůči vodě, neoxidujícím chemikáliím a polárním rozpouštědlům. Polyetylen má širokou oblast použití – v technologickém průmyslu (např. k výrobě fólií, trubek nebo kanistrů) nebo i v průmyslu spotřebním (např. k výrobě hraček a různých výrobků do domácnosti). [3]



Obr. 3: Vzorec polyetylenu [4]

### 1.3.1 Vysoko-hustotní polyetylen

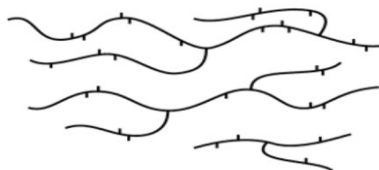
HDPE tvoří dlouhé lineární řetězce (Obr. 4), díky čemuž je vysoce krystalický a tudíž netransparentní. Krystalinita se konkrétně pohybuje od 70 do 90 %. Jeho hustota se pohybuje v rozmezí od 0,940 do 0,970 g/cm<sup>3</sup>. Má dobré bariérové vlastnosti vůči vlhkosti a výbornou odolnost vůči chemikáliím jako jsou například alkoholy, ketony a zředěné kyseliny či zásady. Používá se nejčastěji jako obalový materiál.



Obr. 4: Řetězce HDPE [4]

### 1.3.2 Nízko-hustotní polyetylen

LDPE má polymerní řetězec rozvětvený (Obr. 5), a tudíž krystalizuje méně než HDPE, konkrétně se jeho krystalinita pohybuje mezi 40 až 60 %. Jeho hustota je mezi 0,910 až 0,940 g/cm<sup>3</sup>. LDPE má vynikající pružnost a rázovou houževnatost. Také se vyznačuje dobrou chemickou odolností, odolností vůči olejům a nízkou cenou. Díky nižší krystalinitě je více transparentní než HDPE. LDPE se nejčastěji používá k výrobě fólií.



Obr. 5: Řetězce LDPE [4]

### 1.3.3 Lineární nízko-hustotní polyetylen

Hustota LLDPE odpovídá hustotě LDPE. Jedná se o kopolymer (Obr. 6), při jehož výrobě se jako komonomer používá alken (např. but-1-en, hex-1-en nebo okt-1-en). Obvykle se obsah komonomeru pohybuje mezi 1–10 molárních %. Platí, že čím více komonomeru se do směsi přidá, tím nižší má LLDPE hustotu. Polymerace probíhá za přítomnosti stereospecifických katalyzátorů. Oproti LDPE má vyšší pevnost a odolnost vůči trhlinám, avšak nižší transparentnost. LLDPE se typicky používá k výrobě sáčků a fólií. [6]



Obr. 6: Řetězce LLDPE [4]

## 2 RECYKLACE

Recyklací se obecně rozumí znovuvyužití odpadních materiálů. V některých případech je potřeba různých procesů k přetvoření odpadu na nové produkty. Recyklaci můžeme dělit na primární, sekundární, terciární a kvartální. [7,8]

### 2.1 Primární recyklace

Primární recyklace spočívá ve znovu využití materiálu v jeho původní podobě. Jedná se o nejlevnější typ recyklace. Produkt určený k tomuto typu recyklace musí být čistý a nekontaminovaný. Primární recyklaci lze použít jen u určitého typu produktů a je omezena trvanlivostí materiálu. [8]

### 2.2 Sekundární recyklace (mechanická)

Mechanickou recyklací je myšleno zpracování materiálu pomocí fyzických prostředků, jako jsou drcení, řezání, promývání a další. Jedná se o nejčastěji využívanou metodu recyklace ve většině zemí světa. Obecně platí, že při mechanické recyklaci zůstávají makromolekuly polymeru nedotčené. K mechanické recyklaci jsou vhodné pouze termoplasty, jelikož mohou být roztaveny a znovu tvářeny. Dále je potřeba, aby byl plastový odpad co nejvíce homogenní (vyroben ze stejného typu polymeru) a aby byl relativně čistý. Největším problémem tohoto druhu recyklace je heterogenita zpracovávaného odpadu a snížení jeho kvality při každém dalším cyklu z důvodu degradace materiálu. [8,9,10]

Mechanická recyklace sestává z řady kroků:

1. Sesbírání materiálu a jeho vytřídění
2. Drcení materiálu
3. Čištění a sušení materiálu
4. Zpracování
5. Zhotovení nového produktu [11]

Některé kroky se mohou opakovat, např. čištění, případně se ještě může zařadit krok další, např. chemické ošetření prodlužovačem řetězce u PET.

### 2.2.1 Sesbírání materiálu a jeho třídění

Poté, co se plastový odpad sesbírá (např. do žlutých kontejnerů), převeze se do třídícího dvora a následně se roztřídí podle typu plastu. Třídění může probíhat buď manuálně, nebo automaticky.

- **Manuální třídění** – Spočívá ve vizuální identifikaci typu plastu. Operátoři třídí plastový odpad podle jeho označení, tvaru, barvy nebo obchodní značky. Nevýhodou je vysoké riziko lidské chyby nebo nemožnost identifikace materiálu z důvodu chybějícího značení.
- **Třídění na základě hustoty** – Nejvíce používaný proces rozlišování materiálu při recyklaci. Promytý a již nadrcený plastový odpad je naveden do trubek s vodou a oddělují se částice plavoucí na vodě od těch, které klesají ke dnu. Proces je rychlý a levný a může být považován jako první promývání plastového odpadu.
- **Třídění na základě pěnové flotace** – Podobá se procesu třídění na základě hustoty. Nejdříve jsou materiály smíchány se surfaktantem a následně s vodou. Plasty, které by se za normálních podmínek ve vodě potápěly, jsou díky surfaktantu nadnášeny. Následně se do směsi vpustí vzduch. Vzduchové bubliny přilnou k některému typu plastů a zbytek se začne potápět. Tato metoda se používá převážně k oddělení PET a PVC, které mají podobnou hustotu.
- **Třídění na základě NIR** – Metoda třídění pomocí NIR spočívá v identifikaci plastů pomocí infračerveného záření. Každý materiál na základě chemického složení absorbuje specifickou vlnovou délku záření. Tato metoda se používá především na identifikaci PET lahví. Nelze ji uplatnit na tmavě zbarvené plasty, lepidla a plasty s obsahem aditiv.
- **Třídění pomocí rentgenu** – Používá se pro třídění plastů, které mají podobné hustoty. Pomocí rentgenového záření lze identifikovat chemické prvky, které polymer obsahuje. Díky této metodě lze rozlišit PET od PVC, jelikož PVC obsahuje atomy chloru.
- **Třídění pomocí laseru** – Pomocí laserového paprsku lze zjistit některé materiálové charakteristiky, jako například absorpční koeficient, tepelnou vodivost, tepelnou kapacitu nebo distribuci teploty na povrchu, což umožňuje identifikovat druh materiálu. Tato metoda se nepoužívá při průmyslové recyklaci.



- **Třídění pomocí čtení značek** – Jedná se o třídění pomocí skenovacího zařízení, které rozpozná značení materiálu. [9]

### 2.2.2 Drcení materiálu

Pomocí drcení se zmenší objem recyklovaného materiálu, čímž se usnadní další kroky recyklace. Plastový odpad se drtí pomocí drtičů s nízkou rychlostí a vysokým točivým momentem, které materiál sekají na malé částice o velikosti 3–13 cm.

### 2.2.3 Čištění a sušení materiálu

Při recyklaci je potřeba materiály očistit od zbytků jídel, špíny, papírových etiket atd. V průmyslu se používá buď mokré anebo suché čištění.

- **Mokrý metoda** - Materiály se čistí vodou se surfaktantem nebo pomocí rozpouštědel. Nejdříve se zmenší objem materiálu, poté se materiál očistí vodou, čímž se odstraní největší nečistoty a připevněné části (např. papírové etikety). Následně se přemístí do nádoby s roztokem teplé vody a surfaktantu nebo rozpouštědla, kde se pomocí míchání odstraní lepidla a zbytek nečistot. Poté se pomocí lisu odstraní většina vody a zbytek se vysuší horkým vzduchem. Hlavní nevýhody této metody jsou velká spotřeba energie a vody.
- **Suchá metoda** - Jedná se o čištění pomocí velmi rychle rotujících lopatek v uzavřeném prostoru. Většinou se používá pro materiály vyrobené z jednoho typu polymeru, které nejsou příliš kontaminované. Největší výhodou tohoto procesu je, že k němu není potřeba voda a chemikálie. [12]

### 2.2.4 Zpracování

Nejčastěji se pro zpracování recyklátu používají následující dvě metody:

- **Aglomerace** – Používá se především při recyklaci fólií. Fólie se nadrtí na malé kousky, pomalu se zahřeje a následně rychle zchladí, čímž vzniknou aglomeráty, které nejsou vhodné pro další zpracování. Používají se jako přídavek do směsi k extruzi. Tento proces je velmi energeticky náročný.
- **Vytlačování** – Nejčastěji používaná metoda pro zpracování recyklátu. Nadrcený materiál se nasype do vytlačovacího stroje, kde se pomocí vysoké teploty roztaví a

následně šnekem (případně dvojšnekem) promíchá a posunuje dopředu. Když materiál ve formě taveniny opustí stroj, zchladí se a naseká na pelety.

### 2.2.5 Zhotovení nového produktu

Následně se ze zhotoveného regranulátu vyrobí nový produkt. Podle typu produktu se zvolí typ následného zpracování, jako je například vstřikování, vyfukování nebo vytlačování. [11]

## 2.3 Terciární recyklace (chemická)

Chemickou recyklací se nazývá proces, při kterém je alespoň jeden polymer depolymerizován na monomery nebo oligomery, ze kterých se následně vytvoří nový polymer. Chemicky lze recyklovat dokonce i vícevrstvé obalové materiály, které při mechanické recyklaci musí projít komplexním procesem oddělení vrstev. Mezi tři hlavní procesy se řadí solvolýza, pyrolýza a gazifikace. [12,13,14]

### 2.3.1 Solvolýza

Při solvolýze dochází k depolymerizaci pomocí rozpouštědla. Momentálně se solvolýza nejčastěji používá k rozkladu polymerů vyrobených polykondenzací, jako jsou například PET nebo PA. Proces solvolýzy je ekonomicky nevýhodný, jelikož cena recyklace je dražší než výroba nového produktu. Mezi nejčastější typy solvolýzy patří hydrolyza, alkoholýza nebo aminolýza. [12,13]

### 2.3.2 Pyrolýza

Polymer se při pyrolýze depolymerizuje pomocí zahřívání v inertní atmosféře. Vysoká teplota umožňuje rozbít makrostrukturu polymeru na menší částice. V závislosti na typu polymeru dominuje buď depolymerizace, nebo náhodná fragmentace. Tato metoda je určena plasty, pro které se momentálně nerecyklují mechanicky, ale jsou spalovány, jako např. vícevrstvé obaly nebo vyztužená vlákna. I když je pyrolýza poměrně jednoduchý proces, ekonomicky se vyplatí pouze při pyrolýze velkého objemu naráz. Pyrolýzu je možné rozdělit na termickou, katalytickou a kopyrolýzu. Problémem pyrolýzy je komplexita probíhajících reakcí, obzvláště pokud probíhá více reakcí zároveň. [13,15]

- **Termická pyrolýza** – Polymer se depolymerizuje pomocí zahřívání v inertní atmosféře.

- **Katalytická pyrolýza** – Oproti tepelné pyrolýze reakce probíhá rychleji a za nižší teploty. Nejčastěji se jako katalyzátory používají červený kal, zeolity, amorfni  $\text{SiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo aktivní uhlí. Nevýhodou je následné obtížné odstranění katalyzátoru, což zvyšuje cenu recyklace.
- **Kopyrolýza** – Při kopyrolýze se používají dva nebo více plastů a biomasa. Princip spočívá v jejich synergickém efektu. Výsledek tohoto typu pyrolýzy závisí na druhu materiálu, délce pyrolýzy, teplotě a katalyzátoru. [13]

### 2.3.3 Gazifikace

Při gazifikaci se organický materiál za vysoké teploty přemění na směs spalitelných plynů  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  a další. Při procesu je potřeba použít oxidační činidlo, což většinou bývá pára a kyslík nebo vzduch. Gazifikace je do budoucna potenciální alternativou k pyrolýze, zatím jsou příliš vysoké náklady na její provedení. [15,16]

## 2.4 Kvarterní recyklace (spalování)

Během spalování se z plastového odpadu získává tepelná energie, která se může dále využít např. v různých továrnách anebo ji lze přeměnit např. na energii elektrickou. Plasty mají v porovnání s ostatními materiály vysokou výhřevnost, což z nich dělá vhodný zdroj energie. Mezi výhody spalování plastového odpadu patří nižší potřeba skládkování a možné snížení závislosti na fosilních palivech. Proces se nepovažuje za ekologický, protože se mohou do ovzduší uvolňovat nebezpečné látky, v závislosti na charakteru spalovaného plastu. [17,18,19]

## 2.5 Recyklace Polyethylentereftalátu

Výrobky z polyethylentereftalátu jsou značené PET nebo číslem 1. Jedná se o nejvíce recyklovaný plast, i když pokrývá pouze 14,39 % z celkového plastového odpadu. [9]

### 2.5.1 Mechanická recyklace PET

Nejprve se PET oddělí od ostatních materiálů a následně se rozeleme. Poté se promývá buď tetrachlorethylenem nebo 2% roztokem  $\text{NaOH}$  při  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . Následně se promyje studenou vodou, aby se odstranily nečistoty a regranuluje se. Mohou se také používat prodlužovače řetězců k napravení degradovaných molekul během regranulace. [17,19]

Mechanická recyklace PET je jednoduchá a relativně levná. Mezi její nevýhody patří tepelná a hydrolytická degradace materiálu, která ovlivňuje viskozitu taveniny.

### 2.5.2 Chemická recyklace PET

K chemické recyklaci PET lze použít různé metody solvolýzy.

- Hydrolýza – PET se depolymerizuje na monomery (kyselinu tereftalovou a ethylenglykol). Hydrolýza PET může být alkalická, kyselá anebo neutrální.
- Methanolýza – PET se depolymerizuje v methanolu za vysokého tlaku. Vzniká dimethyltereftalát a ethylenglykol.
- Aminolýza – Aminolýzou PET se získají diamidy kyseliny tereftalové, jako je např. bis(2-hydroxyethylen)tereftalamid. Částečná aminolýza může vylepšit vlastnosti PET. Používá se při výrobě speciálních vláken.
- Amonolýza – Amoniak reaguje s PET za přítomnosti ethylenglykolu. Vzniká tereftalamid.
- Glykolýza – Depolymerizace PET pomocí glykolu. Hlavními vznikajícími produkty reakce jsou bis(2-hydroxyethyl)tereftalát a dipropylenglykol, které se dále dají použít např. pro výrobu polyuretanových pěn. [17]

## 2.6 Recyklace polyolefinů

Polyetylen i polypropylen se řadí mezi polyolefiny, tudíž se recyklují velmi podobně. Polyolefiny lze recyklovat primárně, sekundárně, terciárně i kvarterně.

### 2.6.1 Krakování

Krakováním je myšleno krácení polymerních řetězců. Zahříváním (cca 350–600 °C) molekula začne vibrovat do té míry, že překoná van der Waalovy síly a odštěpí se. Nejdříve se odštěpí uhlíky terciární, poté sekundární a jako poslední primární. Z toho lze vyvodit, že polypropylen se krakuje při nižších teplotách než polyetylen. Krakování má tři fáze: iniciace, propagace a terminace. Při iniciaci vzniká volný radikál, který při propagaci produkuje nové radikály a při terminaci zaniká.

Při krakování polypropylenu a polyetyleny vznikají tři fáze: plynná (uhlovodíky s nízkou molekulovou hmotností), kapalná (zkondenzovaná plynná fáze) a popel. Poměr fází závisí na procesních podmínkách spalování. [20]

### 2.6.2 Výroba paliva

Jako hlavní energetický zdroj paliva se nyní používají fosilní paliva, ropa a zemní plyn, což jsou neobnovitelné zdroje. Fosilní paliva jsou hlavním zdrojem ekologického znečištění ovzduší, skleníkových plynů a kyselosti oceánů.

HD-PE, LD-PE a PP jsou polymery obsahující pouze uhlík a vodík. Oproti biopalivům postrádají kyslík, což je výhodou pro další zpracování. Absence vody v plastových palivech zvyšuje jejich výhřevnost a absence kyslíku dělá palivo méně kyselé a korozivní na rozdíl od biopaliv.

Nejčastěji se pro výrobu paliva z plastů používá hydrokrakování nebo termochemická a katalytická konverze. Termochemická konverze neboli pyrolýza, je nejdominantnějším postupem. Jedná se o rozložení velkých polymerních molekul na menší uhlovodíky v inertním prostředí za vysoké teploty. Tato metoda nemá žádný významný negativní dopad na životní prostředí. Katalytická konverze spočívá v přidání katalyzátorů za účelem zlepšení konverze, kvality paliva a potřeby nižší teploty a času. [21]

## 2.7 Recyklace heterogenních polymerních směsí

Heterogenní směsi lze kromě kontejnerů s plasty nalézt i třeba ve vícevrstvých obalech. Kombinací různých polymerních vrstev lze dosáhnout lepších bariérových vlastností, chemické odolnosti, odolnosti proti vlhkosti nebo i lepších mechanických vlastností než při použití pouze jednoho polymeru. Recyklace těchto obalů je důležitá, avšak poměrně náročná z mnoha důvodů.

Mechanickou recyklaci komplikuje nekompatibilita různých polymerů a jejich degradace. Problémem heterogenní směsi plastů jsou různé chemické struktury a různé teploty tání polymerů ve směsi. Různorodost teplot tání může vést k degradaci materiálů. Většina polymerů je spolu nemísitelná za různých podmínek. Pomocí kompatibilizátorů může být jejich mísitelnost zvýšena. Při mechanické recyklaci vícevrstvých obalů se používají za účelem snížení mezifázového napětí, vytvoření struktury, která odolá vysokému napětí a zlepšení adheze mezi materiály v pevném skupenství. [19]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

### 3 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Pro účely této práce byly použity odpadní nápojové láhve z polyetylentereftalátu (PET), včetně víček (HD-PE) a etiket (pravděpodobně PP).

#### 3.1 Použité materiály

První várka PET lahví (včetně etiket a víček) byla sesbírána na Fakultě technologické Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Jednalo se především o láhve čiré. Druhá část, pro zachování autentičnosti, byla zajištěna ve sběrném dvoře ve Zlíně, v Loukách. Tyto láhve pocházely z recyklačních kontejnerů na plasty. Následně byly láhve z obou zdrojů manuálně roztříděny do následujících skupin: PET láhve čiré bez etiket, PET láhve barevné bez etiket, víčka a směs všeho (včetně etiket). V Tab. 1 jsou zobrazené materiály korespondující k vytríděným částem.

Tab. 1: Přehled materiálů určených k dalšímu použití

láhve	PET
víčka	HD-PE
etikety	PP
směs	PET+HD-PE+PP

Pro vytváření směsí recyklátu s panenským materiálem byly použity materiály HD-PE Liten MB 71 (ITT 8 g/10 min podle ISO 1133-1) a běžný typ PET určeného pro výrobu lahví.

#### 3.2 Drcení

Všechny směsi PET lahví byly nadrceny pomocí Granulátoru EM-AH560-7,5 na částice o velikosti cca 6x7 mm. Směs oddělených víček byla nadrcena pomocí granulátoru EM-AH-260 na částice o rozměrech cca 4x6 mm.

#### 3.3 Čištění a sušení

Nadrcené částice byly rozděleny po skupinách do nádob o objemu 20 l a promyty roztokem 5% hydroxidu sodného v teplé vodě, a to po dobu 10 min. Poté byly proplachovány čistou vodou, dokud nebylo pH materiálu neutrální, což bylo testováno pomocí pH papírku.

Následně byl materiál usušen v laboratoři při pokojové teplotě po dobu jednoho týdne.

### 3.4 Regranulace

Z čistých nadrcených částic byly vytvořeny směsi 30 % recyklátu + 70 % panenského materiálu. Procenta jsou uvedena hmotnostní. Pro srovnání byly v práci studovány také čisté recykláty a čisté panenské materiály. Detailní přehled směsí včetně jejich označení je uveden v Tab. 2.

Tab. 2: Přehled vytvořených směsí a čistých materiálů

PET	čirý	30% recyklát (30PETčirý)
		100% recyklát (100PETčirý)
	barevný	30% recyklát (30PETbar)
		100% recyklát (100PETbar)
	panenský (PETpan)	
HD-PE	30% recyklát (30PE)	
	100% recyklát (100PE)	
	Panenský (PEpan)	
Směs materiálů (PET+PP+HD-PE)	100% recyklát (100směs)	

Následně byly všechny materiály včetně směsí regranulovány pomocí dovušnekového vytlačovacího stroje Scientific – LabTech. PET byl před regranulací sušen 24 hodin při 80 °C. Podmínky vytlačování byly pro PET a směs materiálů: 275 °C na výstupu z vytlačovací hlavy, otáčky byly proměnlivé kvůli variabilitě různých směsí a pro HD-PE: 190 °C na výstupu z vytlačovací hlavy a 10 otáček/min. Vytlačené struny byly chlazeny ve vodní lázni a ihned granulovány pomocí granulovačky.



### 3.5 Lisování desek

Pomocí ručního lisu byly z regranulátů vylisovány desky o rozměrech 12,5 x 12,5 x 0,1 cm. Směsi obsahující PET byly před lisováním opět sušeny 24 hodin při 80 °C. PET a směs všech materiálů byly lisovány po dobu 5 minut při 280 °C a HD-PE také po dobu 5 minut při 170 °C. Chlazení probíhalo v hydraulickém lisu při 60 °C po dobu 10 minut.

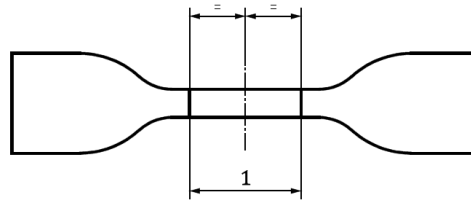
## 4 METODY ANALÝZY

### 4.1 Tahová zkouška

Zkušební tělesa jsou při tahové zkoušce upnuta do čelistí a napínána konstantní rychlostí. Pomocí odečtených hodnot protažení a působící síly v momentě přetržení lze zjistit mechanické vlastnosti vzorku. [22]

#### 4.1.1 Příprava tělísek

Z vylisovaných desek z HD-PE byla pomocí hydraulického vysekávacího stroje ZPS 06102 P1 vysekána tělíska ve tvaru lopatky s rozměrem pracovní části: délka 30 mm a šířka 4 mm (Obr. 7).



Obr. 7: Tvar zkušebního tělesa [14]

Z vylisovaných desek ze směsí obsahujících PET byla vyřezána pomocí pily Minielettromontolit (od firmy Brevetti Montolit SpA) tělíska o rozměrech 12,5 x 1 x 0,1 cm.

#### 4.1.2 Průběh zkoušky

Vzorky byly upevněny do čelistí zkušebního přístroje Galdabini Quasar 25 a do přetržení natahovány rychlostí 100 mm/min. Bylo použito šest zkušebních těles od každého materiálu.

## 4.2 Tokové chování

### 4.2.1 Index toku taveniny

Pro HD-PE byl změřen index toku taveniny (ITT) roztavením plastu za definované teploty a zatížení na plastometru podle normy ČSN EN ISO 1133. Odřezané kousky byly zváženy a index toku taveniny byl vypočítán pomocí rovnice 1.

$$ITT_{(190\text{ }^{\circ}\text{C}, 2,16\text{ kg})} = \frac{S \cdot m}{t} \quad (1)$$

Kde ITT představuje hmotnostní index toku taveniny [g/10 min], S je faktor pro převod gramů za sekundu na gramy za 10 min, m je průměrná hmotnost odřezků [g] a t je interval odřezávání [s].

#### 4.2.2 Toková křivka

U regranulátů HD-PE byla změřena toková křivka na kapilárním reometru Göttfert RG 20. Použita byla kapilára o délce 20 mm a průměru 1 mm. Teplota byla 190 °C a rozmezí smykové rychlosti 50–2 000 s<sup>-1</sup>.

### 4.3 Rentgenová difrakční analýza

Rentgenová difrakční analýza byla měřena na vylisovaných deskách pomocí širokouhlého rentgenového difraktometru Panalytical X'Pert PRO. Měření probíhalo v reflexním módu s monochromatickým zářením CuK $\alpha$  a niklovým filtrem. Radiální snímky intenzity na difrakčním úhlu byly zaznamenány v rozmezí od 5 do 30 °.

Získané difraktogramy sloužily k vyhodnocení krystalinity ( $X_c$ ). Ta byla vypočítána jako podíl plochy pod difrakčními píky ( $I_c$  = krystalická fáze) a celkové plochy ( $I_c + I_a$  = krystalická a amorfní fáze):

$$X_c = \frac{I_c}{(I_c + I_a)} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

### 4.4 Tepelné chování

#### 4.4.1 Diferenciální snímací kalorimetrie

Tepelné chování připravených vzorků bylo analyzováno pomocí diferenciálního skenovacího kalorimetru DSC1 Mettler Toledo. Vzorky byly připraveny odebráním cca 5 mg z vylisovaných desek a umístěním do hliníkových misek, které byly následně uzavřeny, a víčko bylo poté propíchnuto pro usnadnění proudění inertní atmosféry v průběhu měření, která byla zajištěna dusíkem s průtokem 20 ml/s. Teplotní režim se lišil pro vzorky obsahující PET a bez PET. Nicméně rychlost ohřevu a ochlazování byla vždy stejná, a to 10 °C/min. Regranuláty PET byly ohřívány z 25 na 280 °C, poté následovala prodleva na této teplotě po dobu 5 min pro smazání teplotní historie, pak byly vzorky ochlazeny zpět na

teplotu 25 °C a opět následoval ohřev na teplotu 280 °C. Režim byl stejný i pro regranuláty HD-PE, lišil se jen v koncové teplotě, která byla stanovena na 190 °C.

Ze získaných termogramů byly zjištěny charakteristické teploty  $T_g$  (teplota skleného přechodu),  $T_m$  (teplota tání) a  $T_c$  (teplota krystalizace).

#### 4.4.2 Termogravimetrická analýza

Pro zjištění degradačního chování byla použita termogravimetrická analýza za využití přístroje Netzsch STA 449F1. Byla použita jak kyslíková, tak dusíková atmosféra. Teplotní rozsah měření byl stanoven od 25 do 600 °C a rychlost ohřevu byla 10 °C/min. Vzorky byly připraveny odříznutím z vylisovaných desek. Hmotnost se pohybovala kolem 16 mg. Vzorky byly umístěny do otevřených korundových ( $Al_2O_3$ ) misek o objemu 85  $\mu$ l. Ze získaných závislostí úbytku hmotnosti na teplotě je možné vyhodnotit teploty degradace.

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 5.1 Tokové vlastnosti

Tokové vlastnosti byly zjišťovány jednoduchým měřením indexu toku taveniny a následně i měřením tokové křivky na kapilárním reometru. Tato měření byla provedena pouze pro HD-PE materiály. U PET je z důvodů nasákavosti běžnější uvádět vnitřní viskozitu, která se zjišťuje z roztoku. To ale nebylo v této práci provedeno z časových důvodů.

#### 5.1.1 Index toku taveniny

Index toku taveniny byl měřen pouze pro vzorky obsahující HD-PE, a to při 190 °C a zátěži 2,16 kg, podle normy ČSN EN ISO 1133-1. Tokové vlastnosti PET se v tavenině měří obtížně, proto u vzorků obsahujících PET nebyl ITT stanoven. V Tab. 3 jsou uvedeny výsledky měření.

Tab. 3: Výsledky Indexu toku taveniny směsí HD-PE

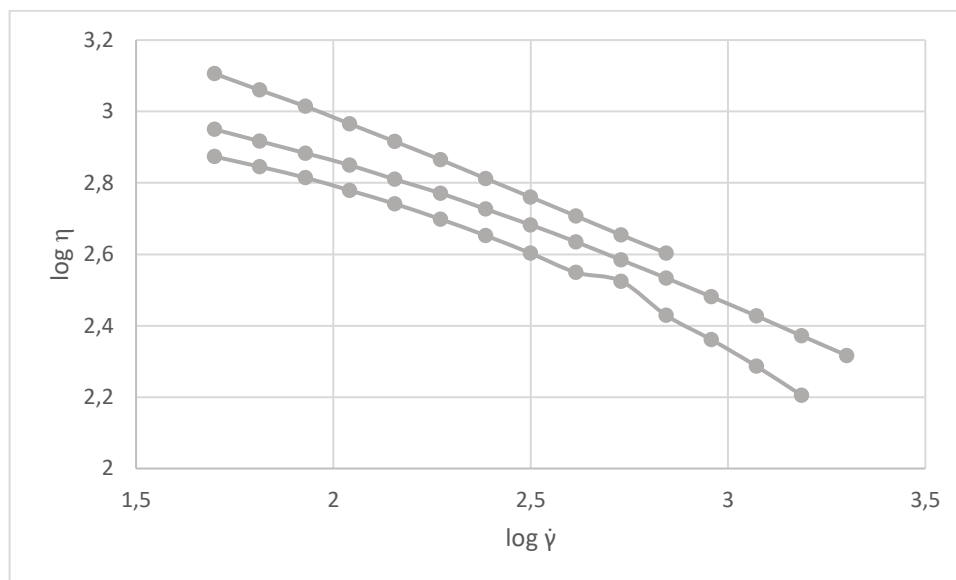
HD-PE	ITT [g/10 min]
PEpan	7,36
100PE	2,63
30PE	8,60

Index toku taveniny panenského materiálu HD-PE Liten MB 71 byl zjištěn 7,36 g/10 min, mírně se tedy liší od hodnoty uváděné výrobcem, tedy 8 g/10 min. Tato odchylka mohla vzniknout nepřesností při provádění zkoušky. Hodnota ITT 100% recyklátu činí 2,63 g/10 min, tedy podstatně méně. Zajímavý je výsledek směsi s 30 % recyklátu, který vykazoval nevyšší hodnotu ITT, a to 8,60 g/10 min.

#### 5.1.2 Viskozitní křivka

Viskozitní křivka byla stanovena rovněž pouze pro HD-PE materiály ze stejných důvodů, jak je uvedeno dříve v textu. Na Obr. 8 jsou viskozitní křivky v logaritnickém tvaru všech HD-PE materiálů. Tvar viskozitních křivek odpovídá pseudoplastickým materiálům, tedy viskozita materiálu se zvyšujícím se smykovým namáháním klesá. Jednotlivé křivky se od

sebe mírně liší. S přidavkem recyklátu jsou posunuty k vyšším hodnotám viskozity. U směsi 100PE klesala viskozita nejrychleji a z důvodu vyčerpání materiálu nebyla získána data pro všechny rychlosti smykové deformace.



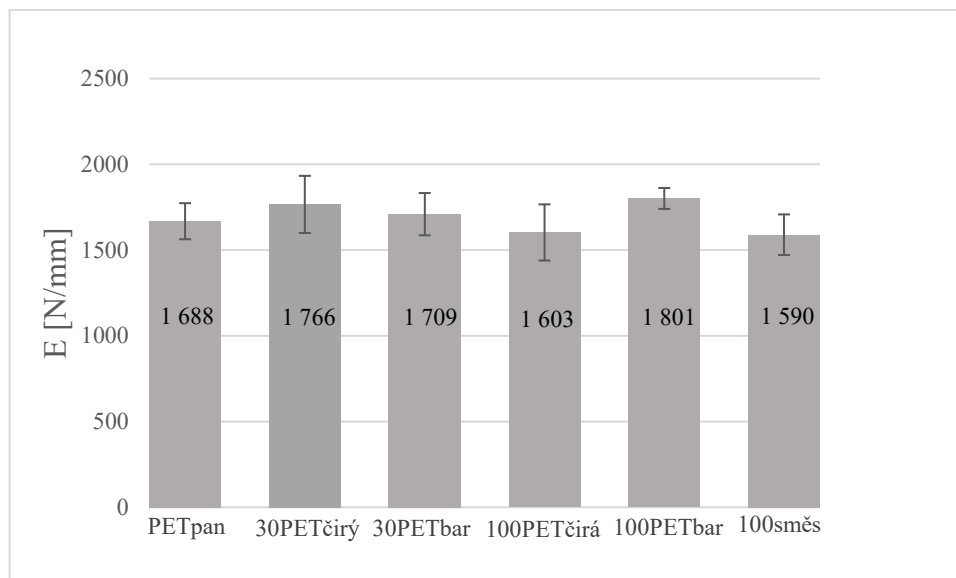
Obr. 8: Toková křivka materiálů HD-PE (shora: 100PE, 30PE, PEpan)

## 5.2 Tahová zkouška

Mechanické vlastnosti připravených regranulátů byly zjišťovány pomocí zkoušky v tahu podle normy ČSN EN ISO 527-1. Získány byly hodnoty modulu pružnosti E, maximálního napětí a prodloužení při přetržení.

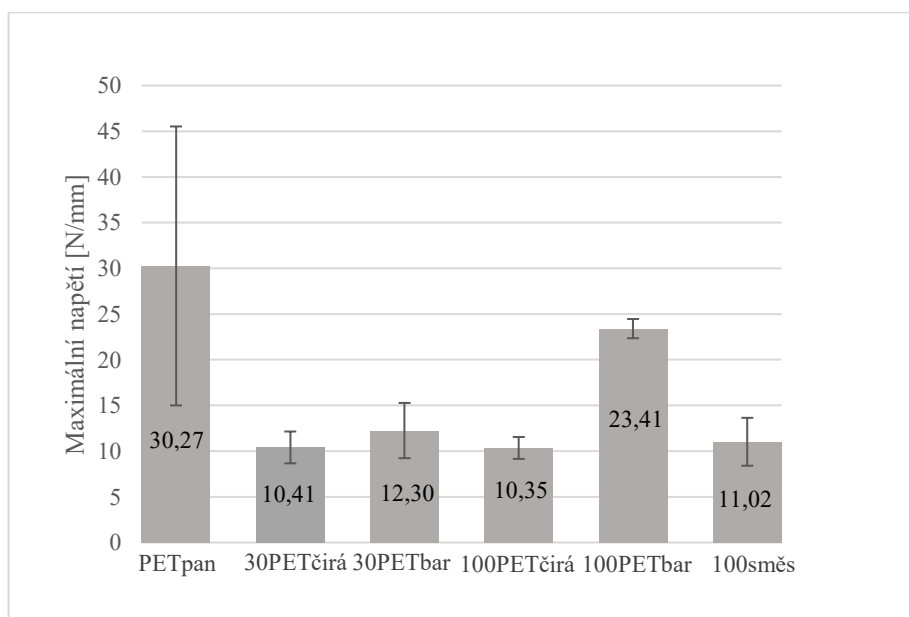
### 5.2.1 Materiály obsahující PET

Na Obr. 9 jsou vidět hodnoty modulu pružnosti E získané u směsí obsahujících PET. Hodnoty jsou velmi vyrovnané a dosahují cca 1600 až 1700 MPa. Nejnižší hodnota byla zjištěna u směsi všech materiálů použitých na výrobu láhve (100směs), což se dalo očekávat vzhledem k přítomnosti PE-HD s nižšími mechanickými vlastnostmi ve srovnání s PET. Nicméně žádný dramatický pokles zaznamenán nebyl.



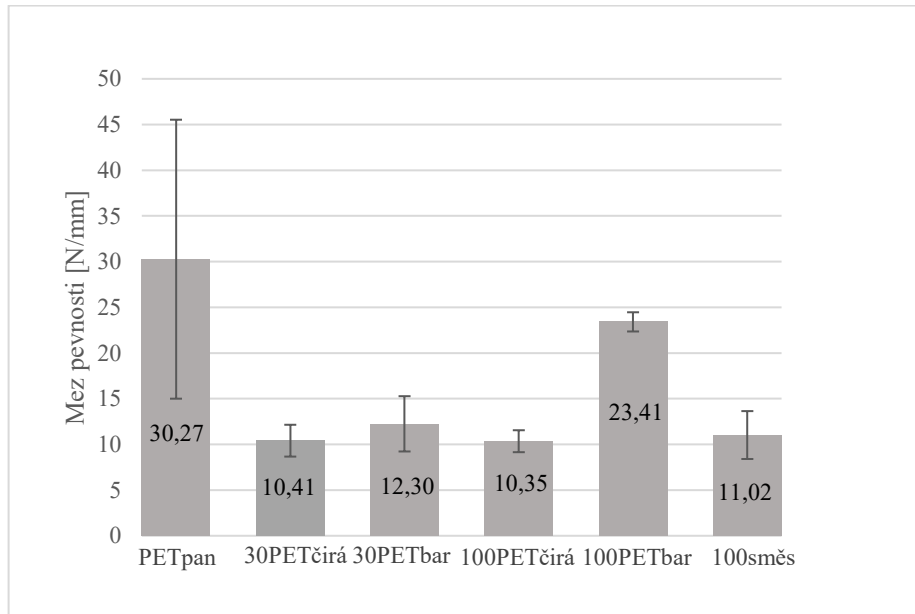
Obr. 9: Modul pružnosti materiálů obsahujících PET

Na Obr. 10 jsou znázorněny zjištěné hodnoty maximálního napětí pro všechny zkoumané materiály. U většiny materiálů byla hodnota cca 11 MPa, výjimku představuje panenský PET s 30, 27 MPa, avšak u tohoto materiálu je příliš vysoká směrodatná odchylka. Pro lepší přesnost měření by bylo potřeba použít více zkušebních těles a vyřadit vybočující hodnoty. Vyšší hodnotu maximálního napětí vykazuje také čistý recyklát barevného PET, a to 23,41 MPa s poměrně malou směrodatnou odchylkou. Tento výsledek je překvapivý.



Obr. 10: Maximální napětí materiálů obsahujících PET

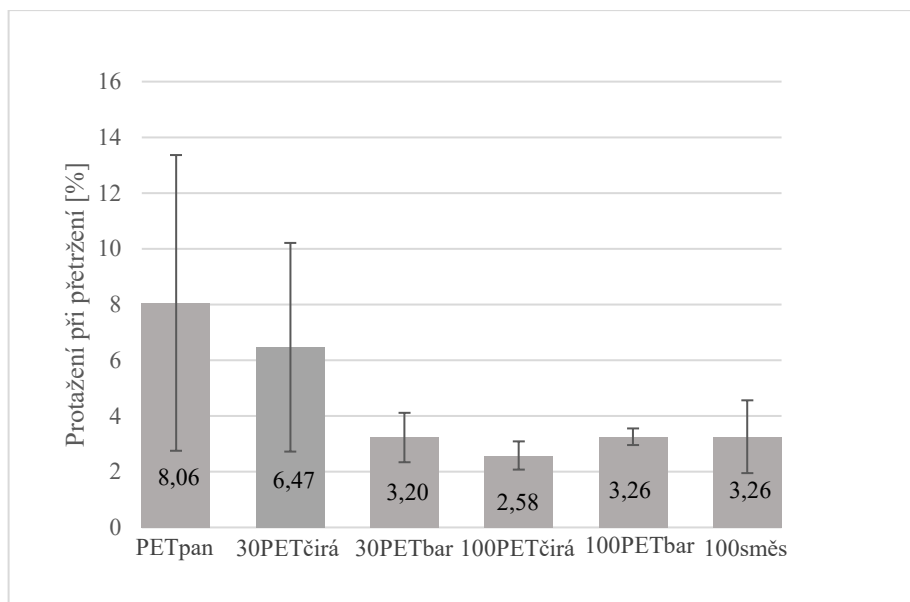
Obr. 11 přináší přehled získaných hodnot meze pevnosti v tahu. Tyto kopírují trend zjištěný u maximálního napětí, viz Obr. 10.



Obr. 11: Mez pevnosti materiálů obsahujících PET

Na Obr. 12 jsou uvedeny hodnoty protažení při přetržení a jak je vidět z vysoké hodnoty směrodatné odchylky, vzorky se při zkoušce chovaly nejednotně. Pro lepší výsledky by bylo nutné provést měření s větším počtem těles a vyřadit vybočující hodnoty. Hodnoty deformace jsou poměrně malé, nejčastěji kolem 3 %. Vyšší hodnoty byly naměřeny u panenského PET a 30PETčirý, avšak u těchto materiálů je směrodatná odchylka opravdu velká.

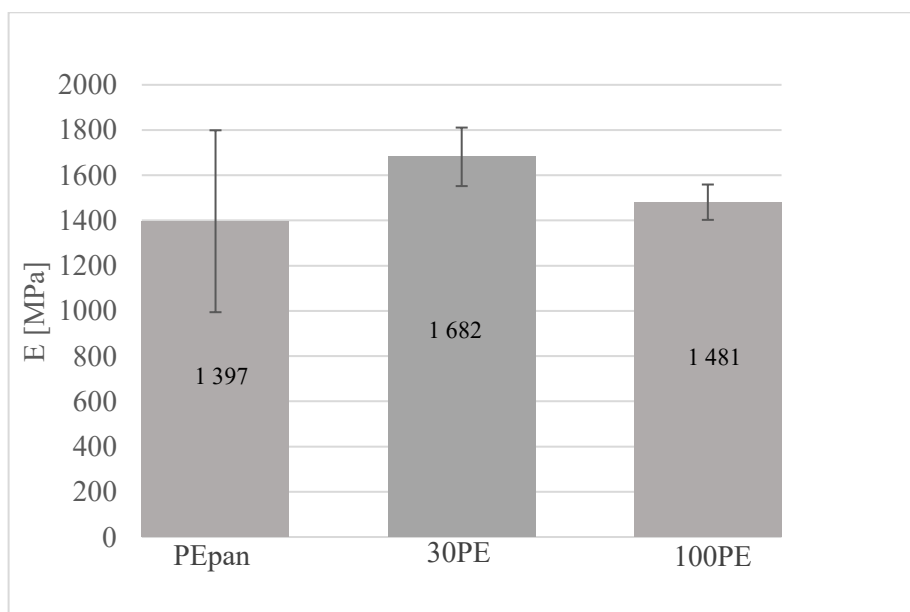




Obr. 12: Protažení při přetržení materiálů obsahujících PET

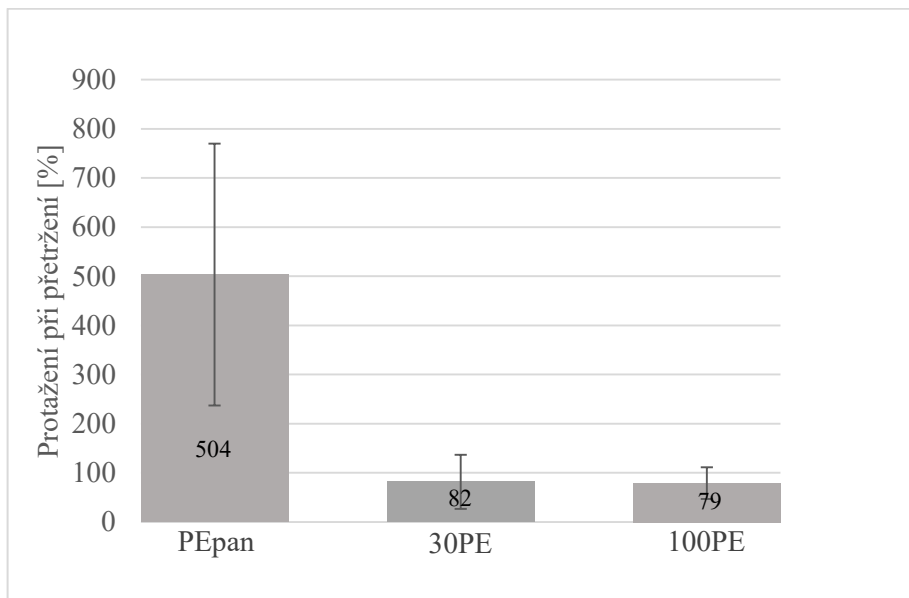
### 5.2.2 Materiály HD-PE

Obr. 13 ukazuje hodnoty modulu pružnosti materiálů HD-PE. Panenský HD-PE vykazuje nevyšší rozptyl výsledků (velká směrodatná odchylka) a nelze tedy vyvozovat jednoznačné výsledky. Je však patrné, že 30% recyklát dosahuje vyšší hodnoty modulu pružnosti než 100% recyklát, a to asi o 200 MPa.



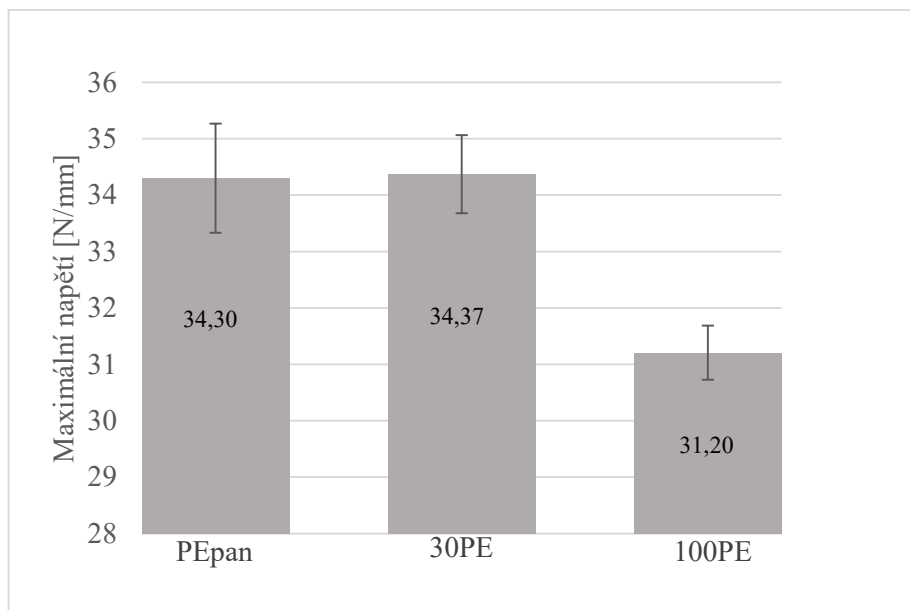
Obr. 13: Modul pružnosti HD-PE materiálů

Na Obr. 14 jsou znázorněny výsledky protažení při přetržení a opět lze pozorovat vysokou směrodatnou odchylku. Nicméně je zřejmé, že panenský HD-PE vysahuje výrazně vyšších hodnot než oba recykláty s velmi podobnými hodnotami.



Obr. 14: Protažení při přetržení HD-PE materiálů

Z Obr. 15 je patrné, že hodnota maximálního napětí je méně nižší u 100% recyklátu ve srovnání s panenským a 30% recyklátem HD-PE. Toto může být způsobeno částečnou degradací recyklovaného polyetyleny, ke které mohlo dojít jak při používání, tak při opakovaném zpracování.



Obr. 15: Maximální napětí HD-PE materiálů

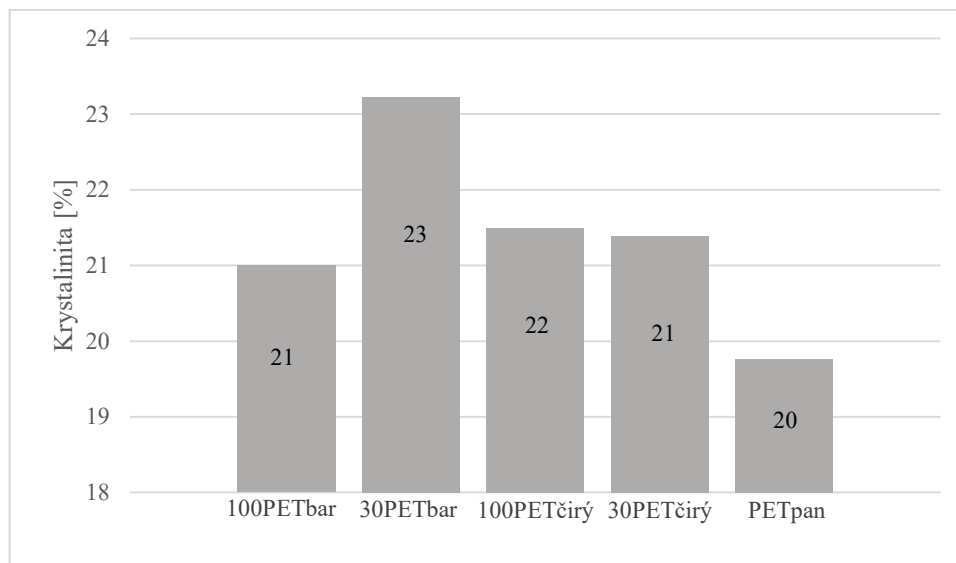
### 5.3 Rengenová difrakční analýza

Širokoúhlá rentgenová difrakce byla použita pro zjištění krystalinity studovaných materiálů.

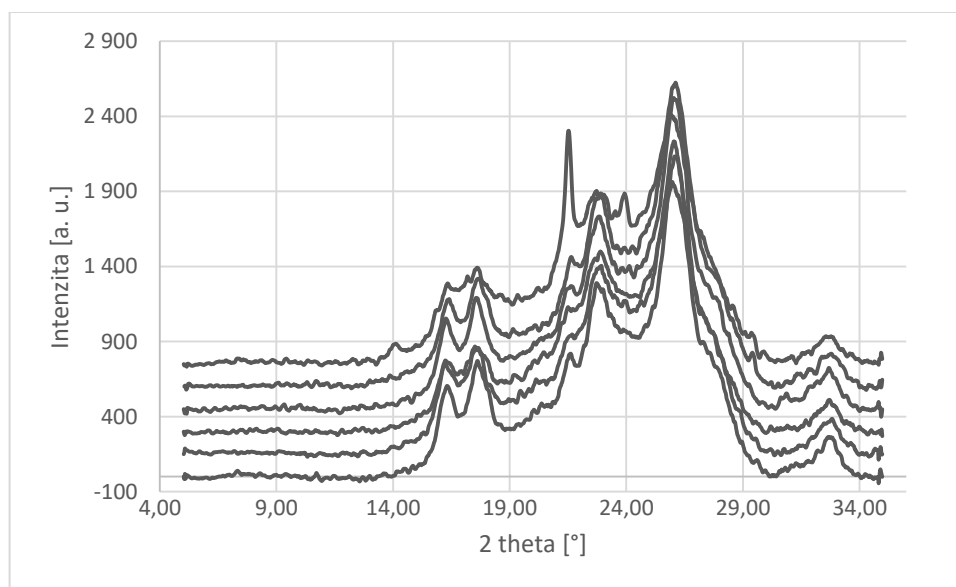
#### 5.3.1 Krystalinita materiálů obsahujících PET

Na Obr. 16 je uvedena krystalinita studovaných materiálů obsahujících PET, která byla získána z rentgenogramů zobrazených na Obr. 17. Na rentgenogramech jsou vidět typické reflexe pro PET při úhlech  $2\theta$   $16,0^\circ$  (011),  $17,5^\circ$  (010),  $22,5^\circ$  (111) a  $25,5^\circ$  (100). A v případě směsi všech materiálů ještě HD-PE při úhlech  $2\theta$   $21,6^\circ$  (110),  $23,8^\circ$  (200). V širokých píčích mohou být schovány i reflexe PP při úhlech  $2\theta$   $14,20^\circ$  (110),  $17,00^\circ$  (040) a  $18,80^\circ$  (130).

Krystalinita směsi 100směs nebyla vyhodnocena kvůli přítomnosti více druhů polymerů. Z Obr. 15 vyplývá, že všechny recykláty vykazují jen mírně vyšší krystalinitu než panenský PET, a to o 1 až 3 %. Důvod může být v nižší molární hmotnosti recyklátu vlivem degradačního štěpení řetězců. Tyto kratší řetězce se pak díky vyšší pohyblivosti snadněji zapojují do krystalických oblastí.



Obr. 16: Kryštalinita materiálu obsahující PET

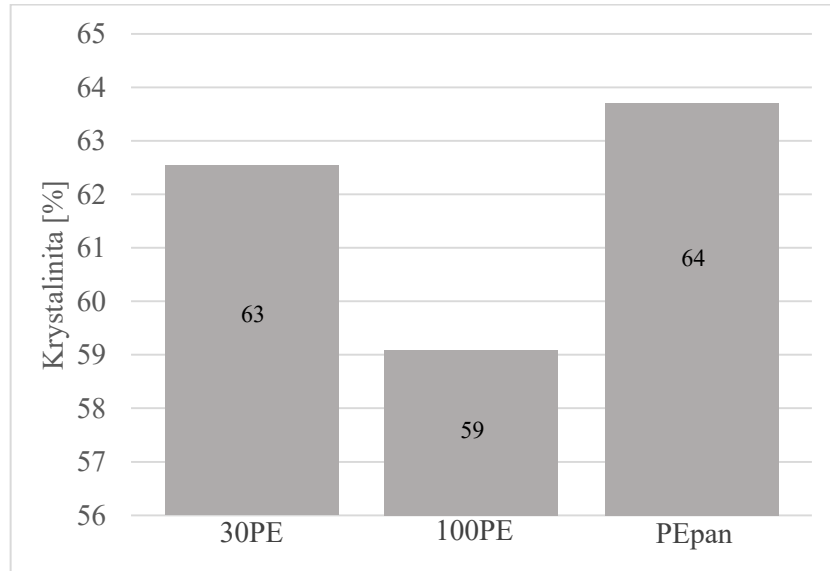


Obr. 17: Záznam rentgenové difrakce materiálu obsahující PET (shora: 100směs, 100PETčirý, 30PET čirý, PETpan, 100PETbar, 30PETbar)

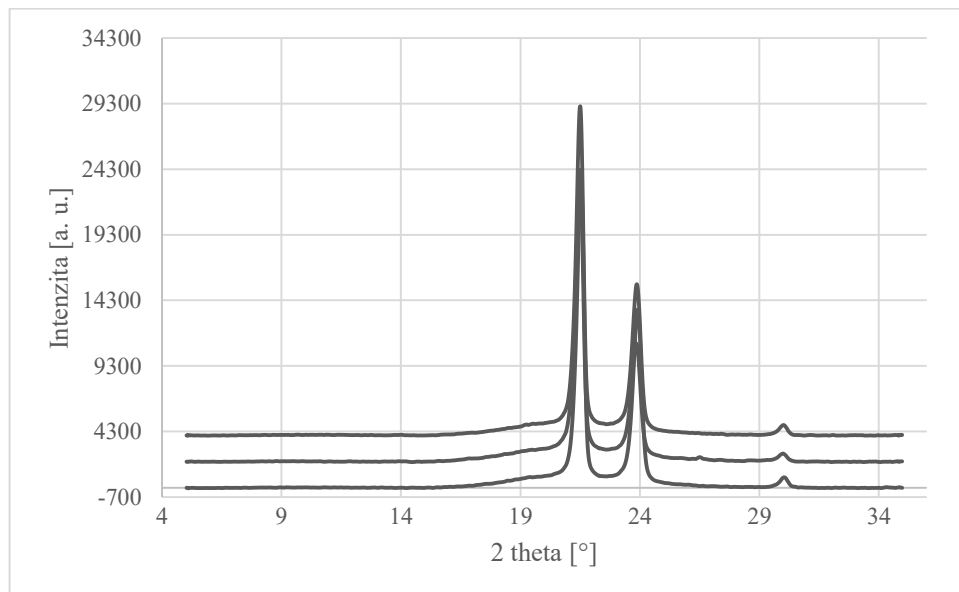
### 5.3.2 Kryštalinita materiálu HD-PE

Kryštalinita materiálu HD-PE je uvedena na Obr. 18. Výpočet byl proveden z naměřených rentgenogramů zobrazených na Obr. 19. Zde jsou patrné dvě typické reflexe pro HD-PE při úhlech  $2\theta$   $21,6^\circ$  (110),  $23,8^\circ$  (200). Jednotlivé rentgenogramy se od sebe příliš neliší. Pokud jde o kryštalinitu, panenský materiál dosahuje hodnoty 64 % a přidavkem 30 % recyklátu

mírně klesá, 100% recyklát pak vykazuje nejnižší krystalinitu 59 %. Toto je očekávaný výsledek, recyklát obsahuje pravděpodobně různé substituenty vzniklé degradací materiálu, a ty pak představují nepravidelnosti snižující krystalinitu.



Obr. 18: Krystalinita materiálů HD-PE



Obr. 19: Záznam rentgenová difrakce materiálů HD-PE (shora: 30PE, 100PE, PEpan)

## 5.4 Diferenciální snímací kalorimetrie

Pro studium tepelného chování byla použita diferenciální snímací kalorimetrie. Zjišťovány byly charakteristické teploty  $T_g$ ,  $T_m$  a  $T_c$  a příslušná tepla tání a krystalizace. Všechny získané hodnoty jsou přehledně shrnuty v Tab. 4.

### 5.4.1 Tepelné chování materiálů PET

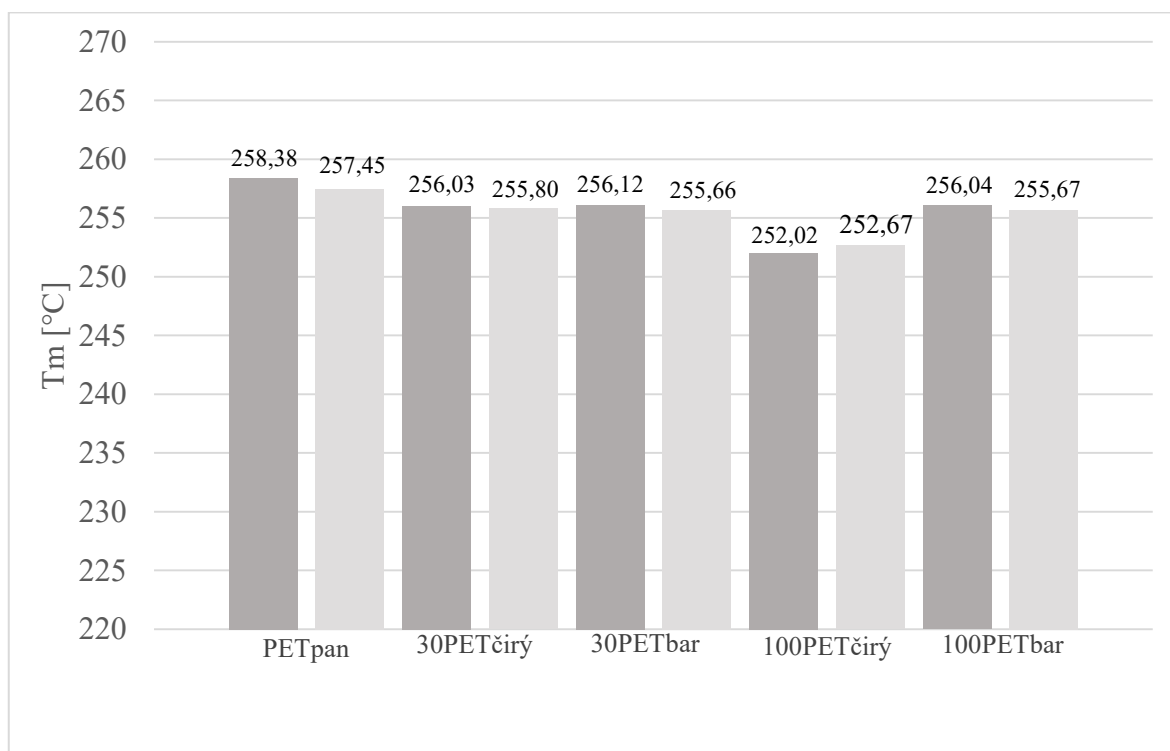
Všechny získané hodnoty z analýzy DSC jsou přehledně shrnuty v Tab. 4.

Tab. 4: Teploty a tepla tání a krystalizace směsí PET

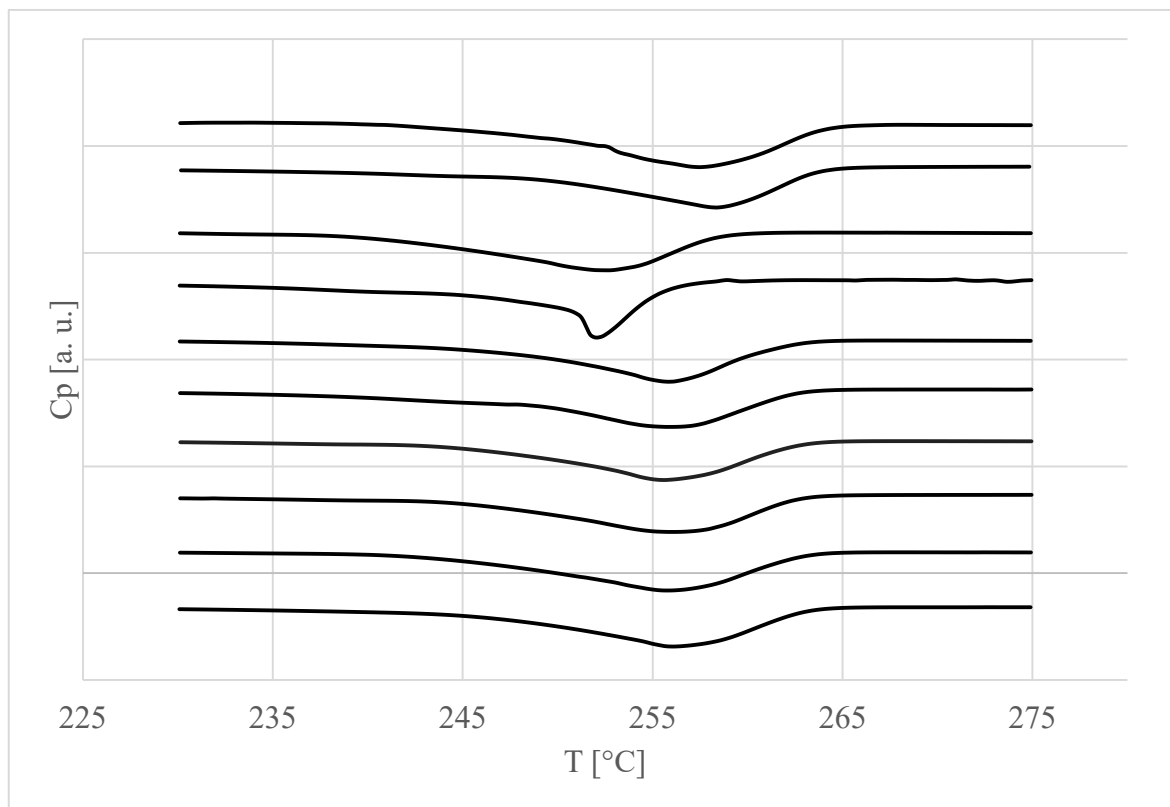
	první ohřev		chlazení		druhý ohřev	
	$T_m$ [°C]	$\Delta H_m$ [J/kg]	$T_c$ [°C]	$\Delta H_c$ [J/kg]	$T_m$ [°C]	$\Delta H_m$ [J/kg]
PETpan	258,38	54	216,34	59	254,94	59
PETpan vysušený	257,45	54	216,34	61	254,55	63
30PETčírý	256,03	56	216,72	60	250,57	57
30PETčírý vysušený	255,8	57	216,03	60	249,88	60
100PETčírý	252,02	48	215,27	57	244,53	57
100PETčírý vysušený	252,67	56	212,65	58	245,39	59
30PETbar	256,12	57	216,37	59	250,69	53
30PETbar vysušený	255,66	58	214,94	59	249,4	59
100PETbar	256,04	55	215,99	59	249,9	61
100PETbar vysušený	255,67	55	214,63	58	249,26	58

Na Obr. 20 jsou uvedeny teploty tání materiálů obsahujících PET, a to při prvním ohřevu vzorků z vylišovaných desek. Na Obr. 21 jsou vyobrazeny příslušné endotermy tání. Analýza byla provedena na vzorcích nesušených a také na vzorcích vysušených při 80 °C

po dobu 24 hodin. Vliv sušení na teplotu tání byl prakticky zanedbatelný, ve většině případů došlo u vysušených vzorků k velmi malému poklesu teploty tání, v rámci jednoho stupně. Všechny křivky tání obsahují pouze jeden pík odpovídající teplotě tání. Nejvyšší teplotu vykazuje panenský PET, cca 258 °C. Přídavek recyklátu vede ke snížení této teploty o cca 2 °C. Stejná situace je u 100% recyklátu barevného. Čirý 100% recyklát vykazuje nejnižší teplotu tání, a to cca 252 °C.



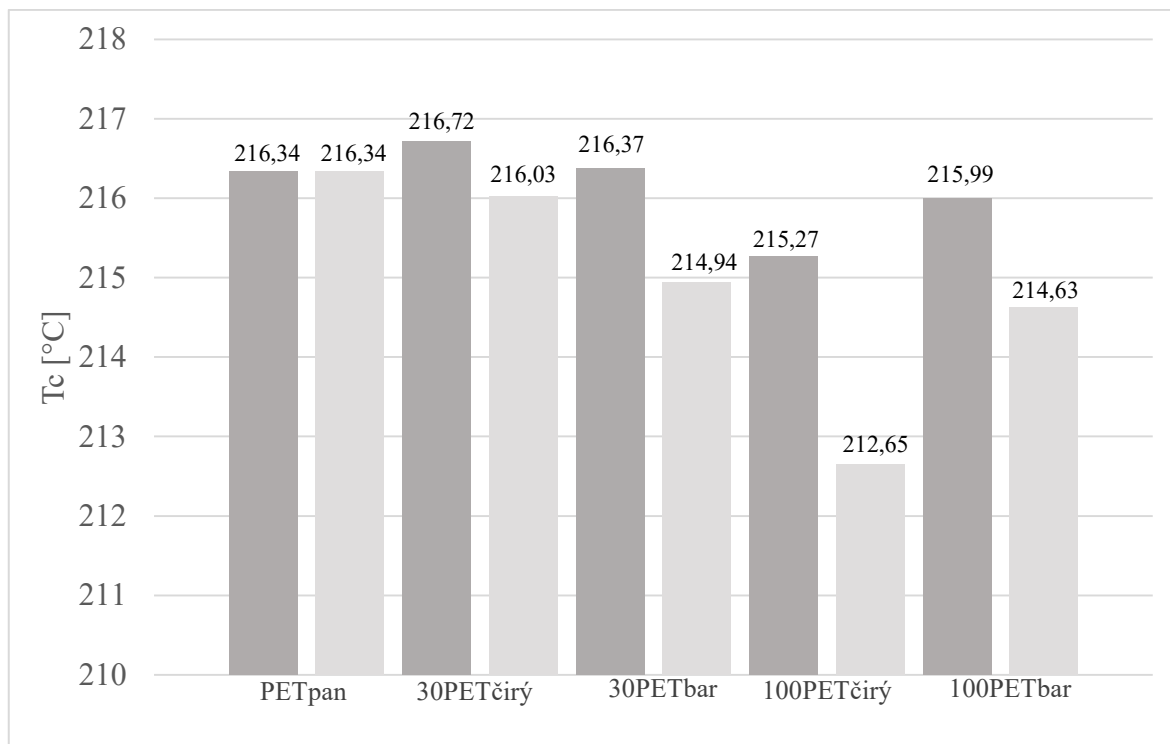
Obr. 20: Teploty tání materiálů PET v průběhu prvního ohřevu (tmavé sloupce jsou hodnoty materiálu nevysušeného a světlé vysušeného)



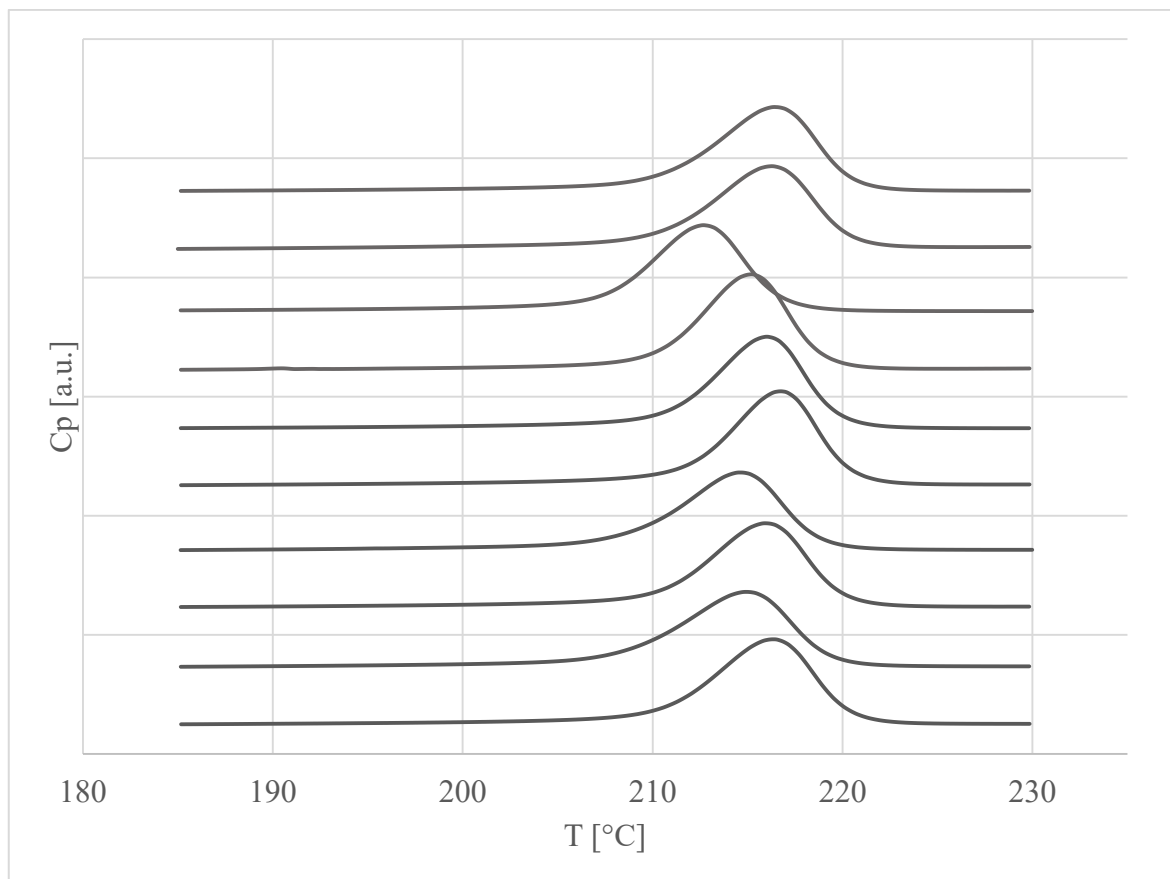
Obr. 21: Endotermie prvního ohřevu materiálů PET (shora: PETpan vysušený, PETpan, 100PETčirý vysušený, 100PETčirý, 30PETčirý vysušený, 30PETčirý, 100PETbar vysušený, 100PETbar, 30PETbar vysušený, 30PETbar)

Na Obr. 22 jsou uvedeny hodnoty teploty krystalizace získané při ochlazování z exotermů krystalizace (viz. Obr. 23). Opět byla provedena analýza na vzorcích nesušených a vysušených. Z Obr. 23 je vidět, že ve všech případech se vytvořil jeden exoterm odpovídající krystalizaci. Teplota krystalizace byla získána z vrcholu tohoto exotermu. Na Obr. 22 je vidět, že vysušené vzorky vykazovaly zpravidla nižší teplotu krystalizace, sušení má tedy vliv na krystalizaci, a to zejména u recyklátů. Teplota krystalizace se pohybovala kolem 215 °C, pouze v případě 100% recyklátu čírého PET je teplota po vysušení výrazněji nižší, a to cca 213 °C. Tento materiál také vykazoval nejnižší teplotu tání (Obr. 20).



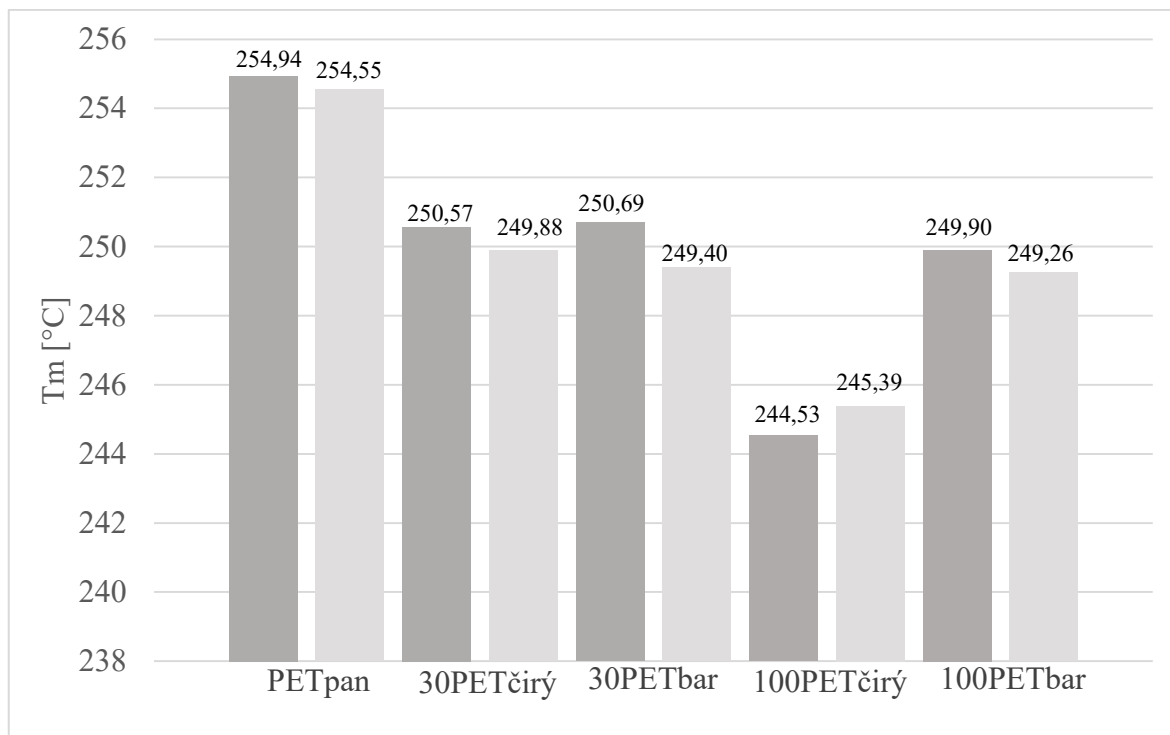


Obr. 22: Teploty krystalizace materiálů PET v průběhu ochlazování (tmavé sloupce jsou hodnoty materiálu nevysušeného a světlé vysušeného)

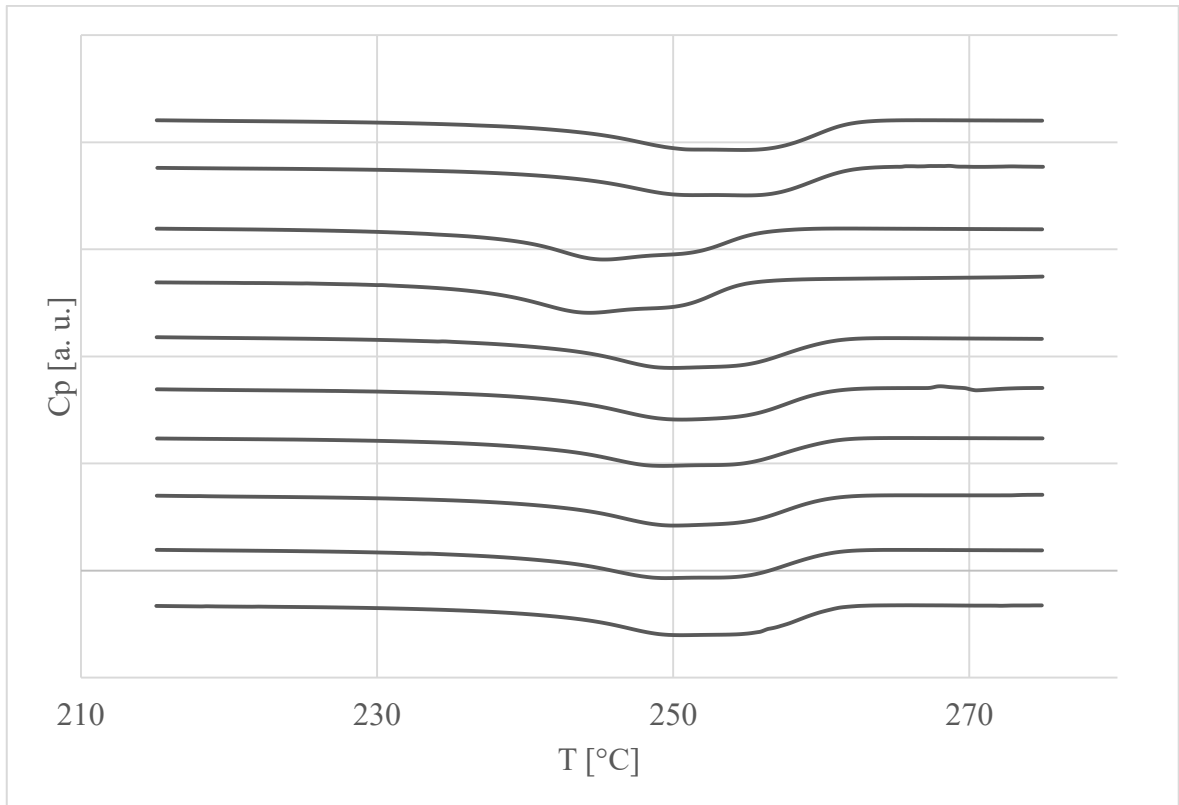


Obr. 23: Exotermie chlazení materiálů PET (shora: PETpan vysušený, PETpan, 100PETčirý vysušený, 100PETčirý, 30PETčirý vysušený, 30PETčirý, 100PETbar vysušený, 100PETbar, 30PETbar vysušený, 30PETbar)

Na Obr. 24 jsou uvedeny hodnoty teploty tání druhého ohřevu po kontrolované krystalizaci a příslušní endotermie tání jsou na Obr. 25. Ve srovnání v prvním tání jsou endotermie velmi široké a většinou vykazují dva vrcholy. Za teplotu tání byl brán vrchol dominantní. Dvojité endotermie poukazuje na přítomnost více fází a může zahrnovat také rekrystalizační procesy spojené se zdokonalováním krystalických objektů. Teplota tání po kontrolované krystalizaci je obecně nižší než při prvním ohřevu. U panenského PET dosahuje hodnoty cca 255 °C versus cca 258 °C. Vysušení vzorků zpravidla vede k velmi mírnému snížení teploty tání, tak jako v předešlém případě. Přídavek recyklátu k panenskému PET vede rovněž ke snížení teploty tání o cca 4 až 5 °C, pouze v případě 100% čirého recyklátu je snížení dramatictější, a to až o 10 °C. Tento recyklát vykazuje nejnižší teploty ve všech případech.



Obr. 24: Teploty tání materiálů PET v průběhu druhého ohřevu (tmavé sloupce jsou hodnoty materiálu nevysušeného a světlé vysušeného)



Obr. 25: Endotermy druhého ohřevu materiálů PET (shora: PETpan vysušený, PETpan, 100PETčirý vysušený, 100PETčirý, 30PETčirý vysušený, 30PETčirý, 100PETbar vysušený, 100PETbar, 30PETbar vysušený, 30PETbar)

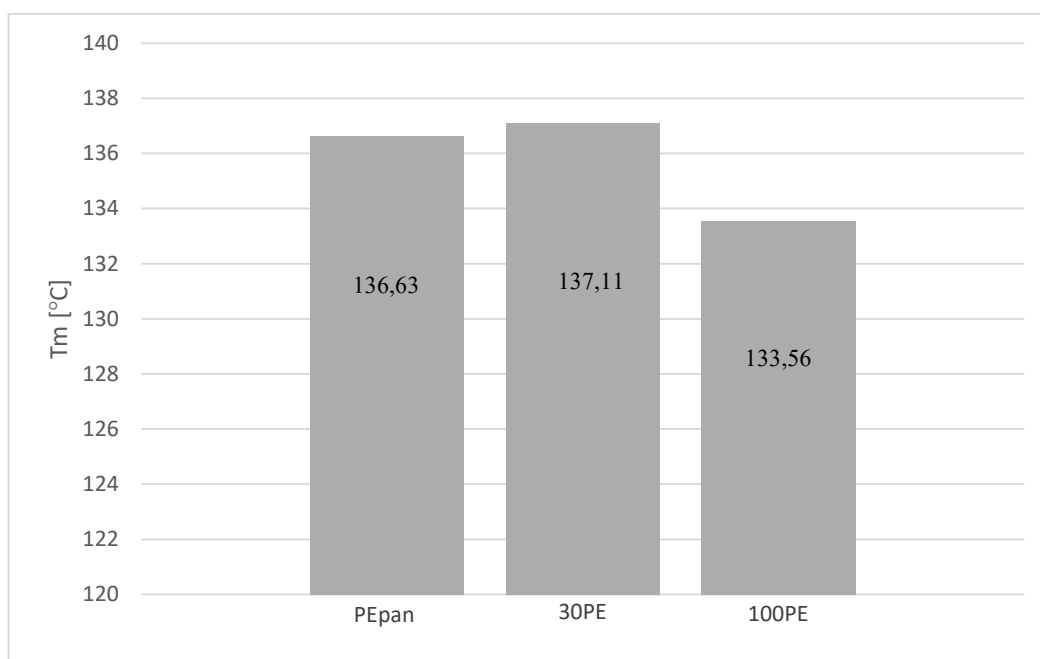
#### 5.4.2 Tepelné chování materiálů HD-PE

Stejný teplotní režim jako v předešlé kapitole byl použit i v případě materiálů HD-PE. Všechny získané hodnoty z analýzy DSC jsou shrnuty v Tab. 5.

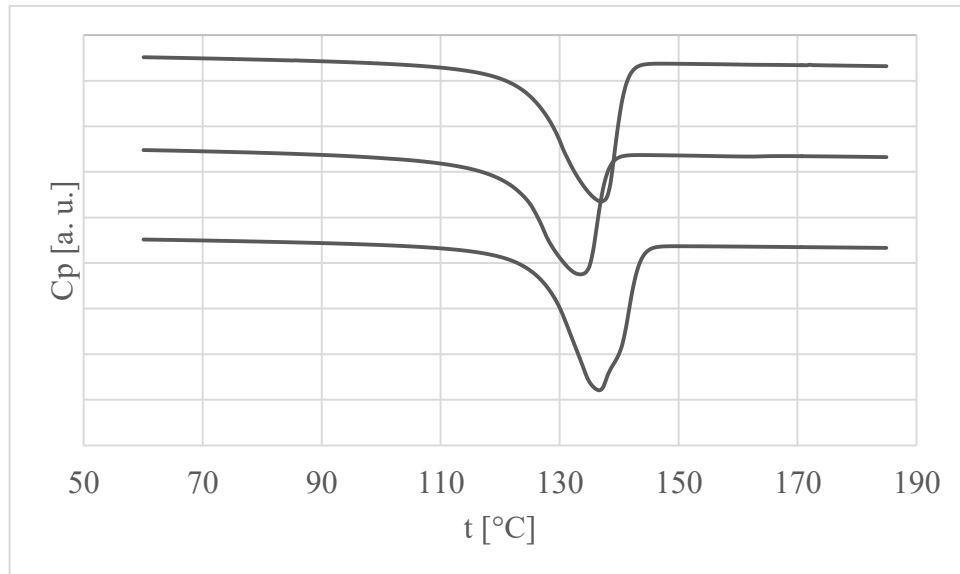
Tab. 5: Teploty a tepla tání a krystalizace směsí HD-PE

	první ohřev		chlazení		druhý ohřev	
	T <sub>m</sub> [°C]	ΔH <sub>m</sub> [J/kg]	T <sub>c</sub> [°C]	ΔH <sub>c</sub> [J/kg]	T <sub>m</sub> [°C]	ΔH <sub>m</sub> [J/kg]
PEpan	136,63	234	118,62	245	133,8	254
30PE	137,11	224	118,56	233	134,33	240
100PE	133,56	204	116,44	109	131,2	216

Na Obr. 26 jsou uvedeny teploty tání prvního ohřevu těchto materiálů a příslušné endotermie tání jsou zobrazeny na Obr. 27. Lze pozorovat jeden pík, který je však nesymetrický, případně tvoří rameno. Teplota tání panenského HD-PE je cca 137 °C a přidavkem recyklátu se zásadně nemění. Nicméně teplota tání 100% recyklátu je nižší asi o 3 °C. Nižší teplota tání je spojená s menší tloušťkou lamel. To může být způsobeno přítomností defektů na polymerním řetězci v důsledku degradace, čemuž odpovídá i pokles tepla tání poukazující na nižší krystalinitu (Tab. 5). Tyto výsledky jsou v dobré shodě s výsledky WAXS (Obr. 17): recyklát vykazoval nižší krystalinitu.

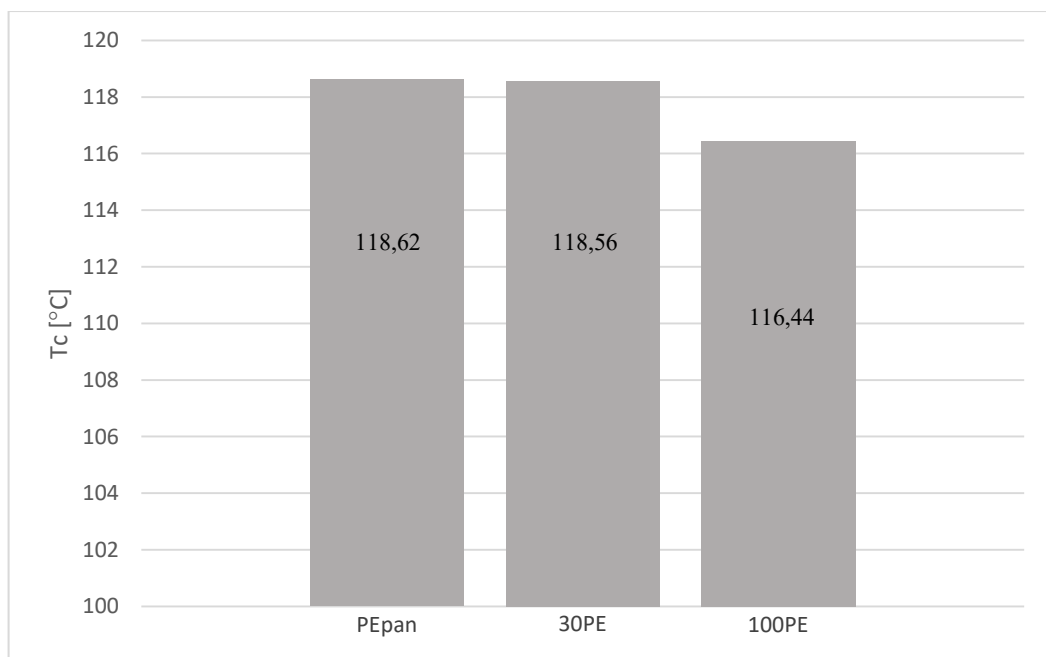


Obr. 26 Teploty tání materiálů HD-PE v průběhu prvního ohřevu

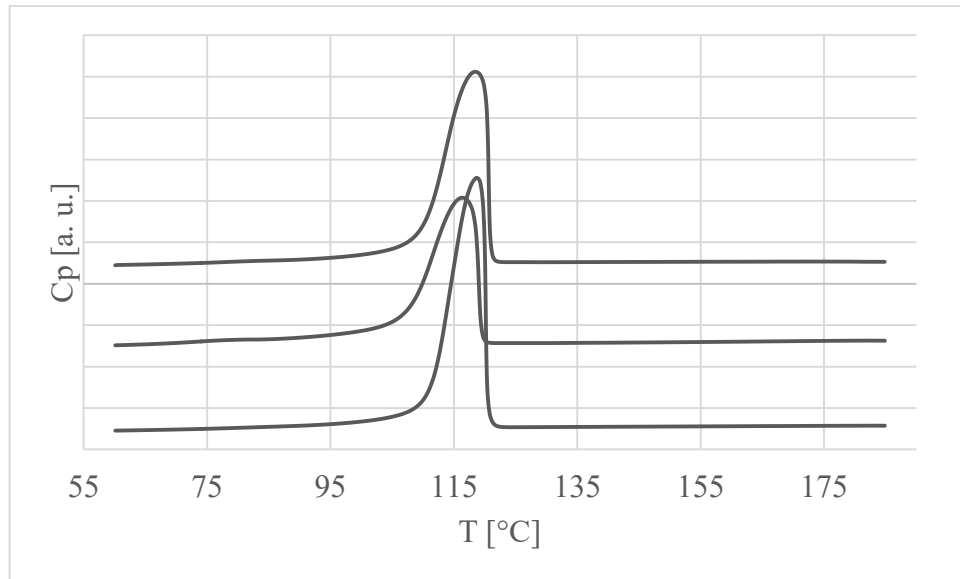


Obr. 27: Endotermy prvního ohřevu materiálů HD-PE (shora: 30PE, 100PE, PEpan)

Na Obr. 28 jsou uvedeny teploty krystalizace při kontrolovaném chlazení. Ty byly získány z vrcholů exotermů krystalizace, viz Obr. 29. Je zřejmé, že přidavek recyklátu k panenskému HD-PE nemá vliv na teplotu krystalizace, která dosahuje cca 118,5  $^{\circ}\text{C}$ . 100% recyklát však vykazuje asi o 2  $^{\circ}\text{C}$  nižší teplotu krystalizace. Toto opět lze spojit s přítomností nepravidelností na řetězci v důsledku degradace.

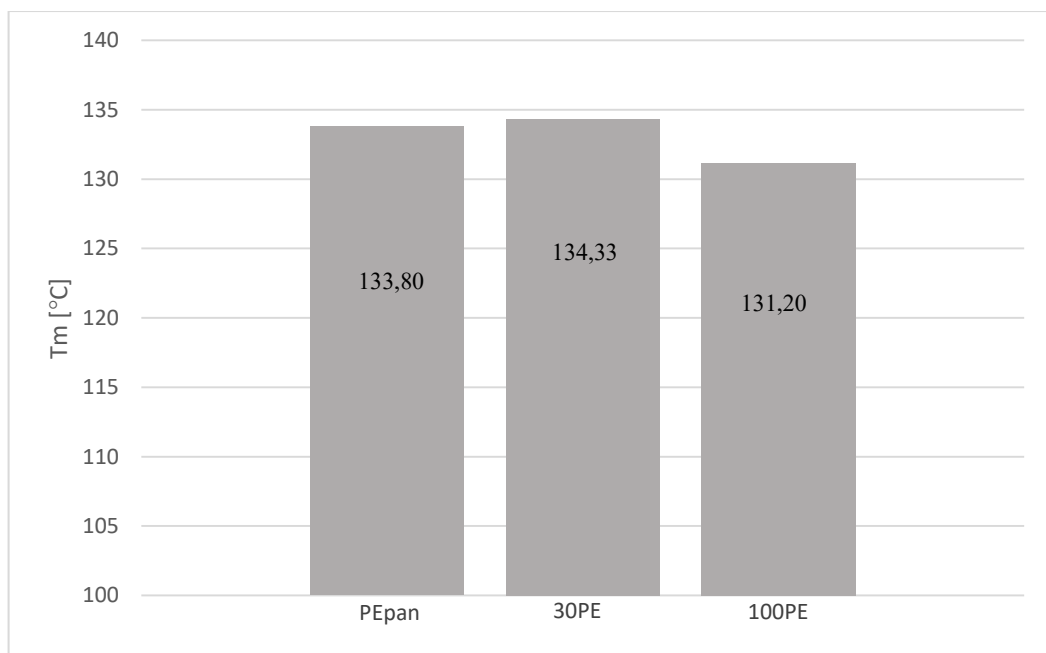


Obr. 28: Teploty tání materiálů HD-PE v průběhu ochlazování

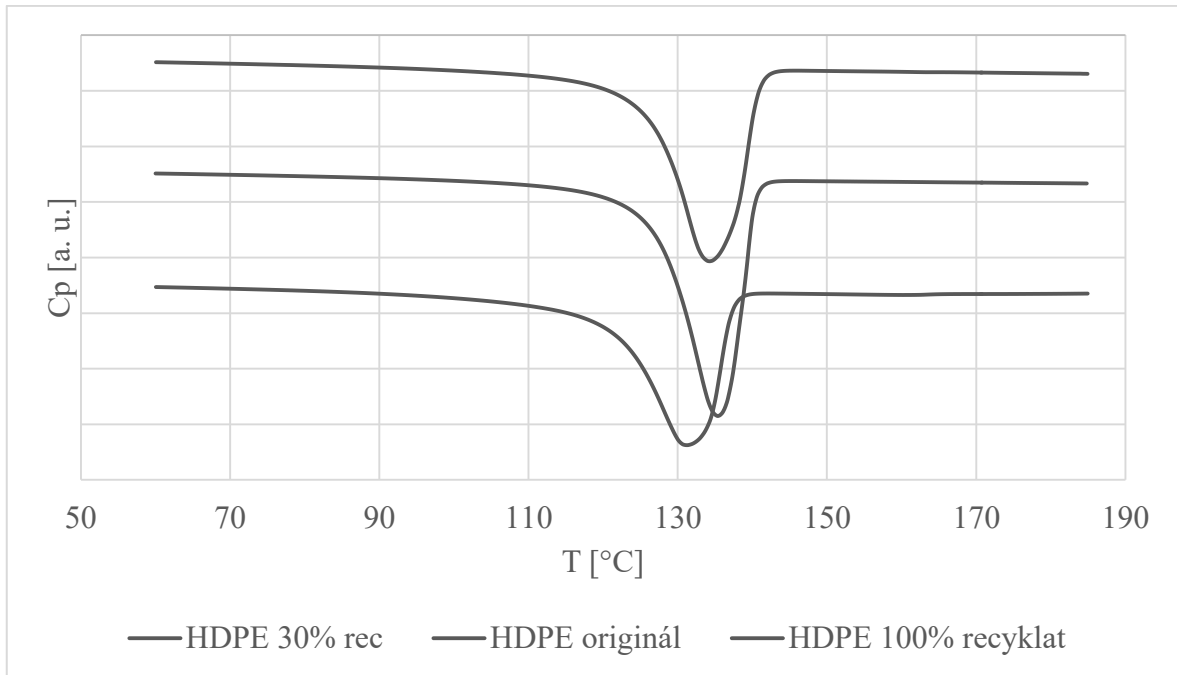


Obr. 29: Exotermie krystalizace materiálů HD-PE (shora: 30PE, 100PE, PEpan)

Obr. 30 znázorňuje hodnoty teploty tání při druhém ohřevu a Obr. 31 pak odpovídající endotermie tání. Zle pozorovat snížení teploty tání ve srovnání s prvním ohřevem, a to asi o 3 °C. Přidavek recyklátu k panenskému materiálu se nijak významně neprojevuje, avšak 100% recyklát vykazuje nižší teplotu tání cca o 2,5 °C. Endotermie tání tvoří jeden pík a výrazně se od sebe neliší (Obr. 31).



Obr. 30: Teploty tání materiálů HD-PE v průběhu druhého ohřevu



Obr. 31: Endotermie druhého ohřevu materiálů HD-PE (shora: 30PE, 100PE, PEpan)

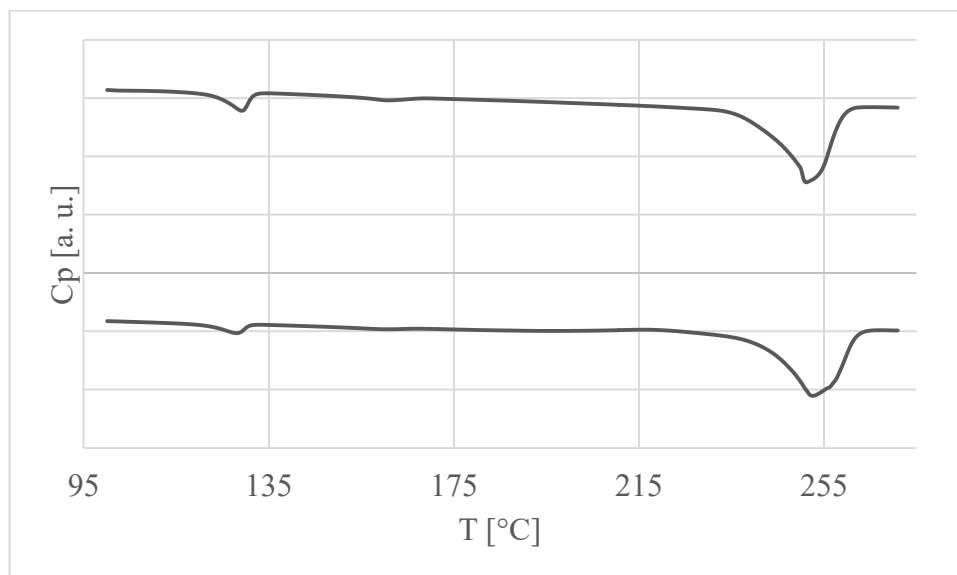
### 5.4.3 Tepelné chování směsi materiálů

Na Obr. 32 jsou uvedeny endotermie tání směsi všech materiálů použitých na výrobu PET láhve. Z tvaru křivky lze usuzovat, že materiály jsou nemísitelné, vykazují samostatné píky tání. HE-PE taje při teplotě nejnižší, a to cca 128 °C, následně se vytvořil velmi malý pík při teplotě 159 °C odpovídající polypropylenu (pochází z etiket) a dále dominantní pík PET při cca 253 °C. Velikost píků odpovídá složení směsi, nejvíce je zastoupen PET a nejméně PP. Vysušení materiálu před analýzou se nijak výrazně na výsledcích neprojevilo, hodnoty jsou vždy mírně nižší. Všechny zjištěné teploty jsou uvedeny v Tab. 6



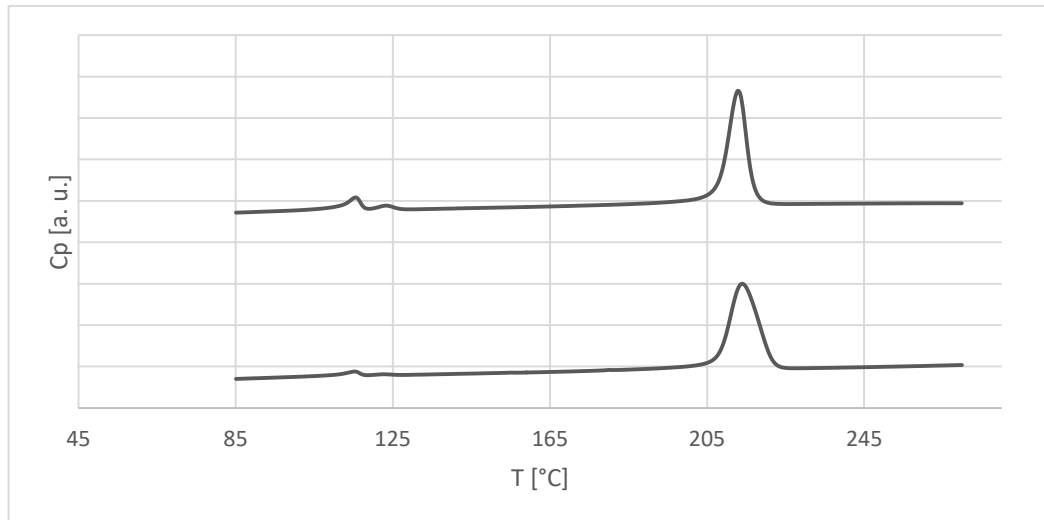
Tab. 6: Teploty a tepla tání a krystalizace směsi materiálů

	první ohřev		chlazení		druhý ohřev	
	T <sub>m</sub>	ΔH <sub>m</sub>	T <sub>c</sub>	ΔH <sub>c</sub>	T <sub>m</sub>	ΔH <sub>m</sub>
	[°C]	[J/kg]	[°C]	[J/kg]	[°C]	[J/kg]
100směs	128,01	3	115,3	2	127,85	2
	159,01	1	122,62	0,5	159,84	0,5
	252,57	50	214,07	55	248,24	49
100směs vysušený	129,16	6	115,65	7	128,67	6
	160,34	2	123,29		161,01	2
	251,2	51	212,81	53	246,07	53



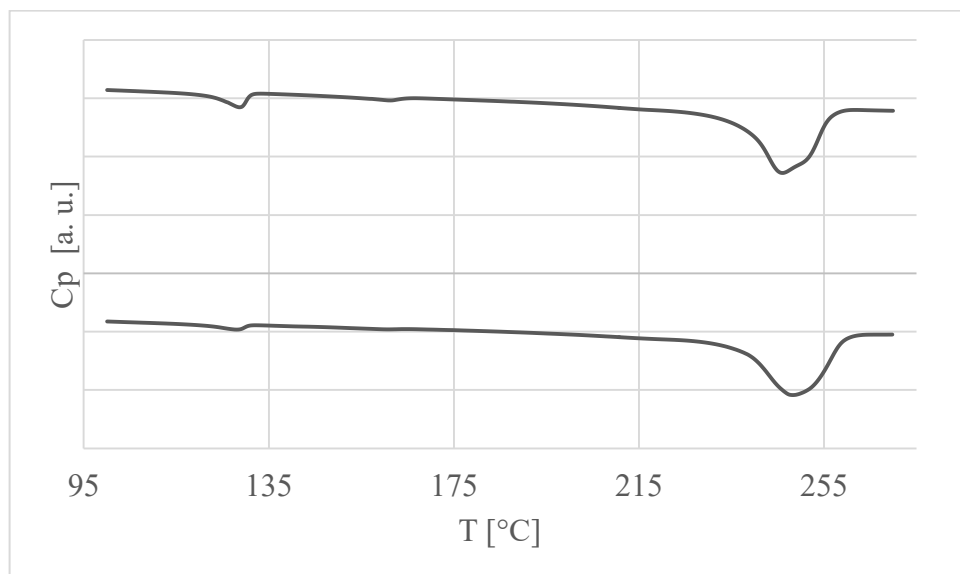
Obr. 32: Endotermie prvního ohřevu směsi 100 (nahore: vysušená, dole: nesušená)

Obr. 33 ukazuje exotermie krystalizace kontrolovaně chlazených směsí. Je zde dominantní pík krystalizace PET při cca 214 °C a pak další dva malé píky odpovídající krystalizaci PP při 123, respektive 116 °C. Vliv sušení na výsledky je zanedbatelný.



Obr. 33: Exotermie krystalizace směsi 100 (nahore: vysušená, dole: nesusená)

Obr. 34 představuje endotermie tání kontrolovaně krystalizovaných směsí, přičemž záznamy jsou podobné těm z prvního tání (Obr. 32). K poklesu teploty tání dochází pouze u PET o cca 4 °C, teplota tání HD-PE a PP zůstávají téměř shodné (viz. Tab. 6).



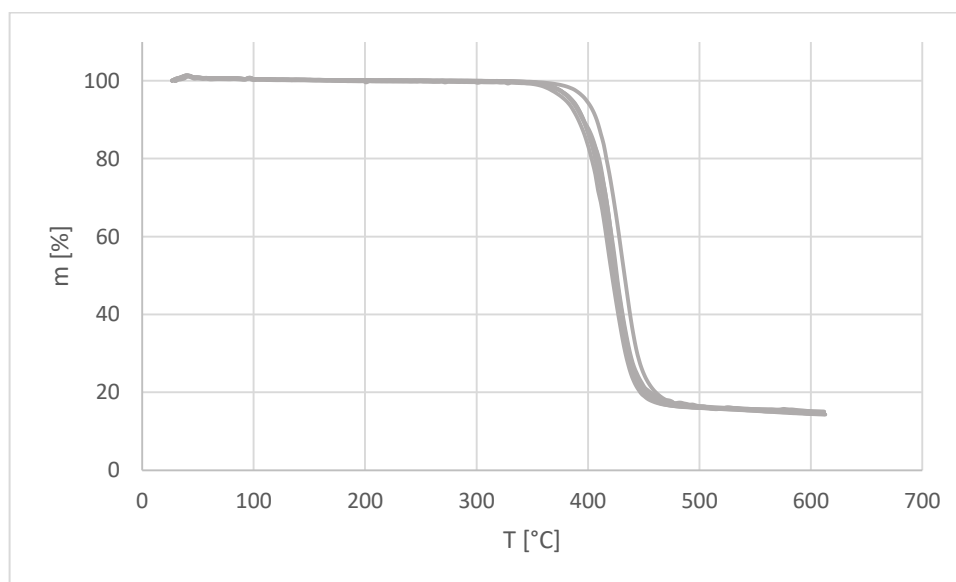
Obr. 34: Endotermie druhého ohřevu směsi 100 (nahore: vysušená, dole: nesusená)

## 5.5 Termogravimetrická analýza

Pro zjištění degradačního chování při zvýšené teplotě byla provedena termogravimetrická analýza a to v dusíkové atmosféře a také na vzduchu.

### 5.5.1 Tepelná degradace materiálů obsahujících PET

Na Obr. 35 je vidět úbytek hmotnosti vzorků při ohřevu v dusíkové atmosféře. K dramatickému úbytku začíná docházet při cca 400 °C ve všech případech, při teplotě cca 450 °C již dochází jen k dalším velmi pozvolným úbytkům. Zbytek po tepelné degradaci ve všech případech je cca 15 %, viz Tab. 7. Žádné dramatické rozdíly mezi materiály nebyly pozorovány, křivky se prakticky překrývají, a proto nejsou ani v grafu na Obr. 35 rozlišeny. Pouze křivka 100směs mírně vybočuje, což je pravděpodobně způsobeno přítomností více druhů polymerů.



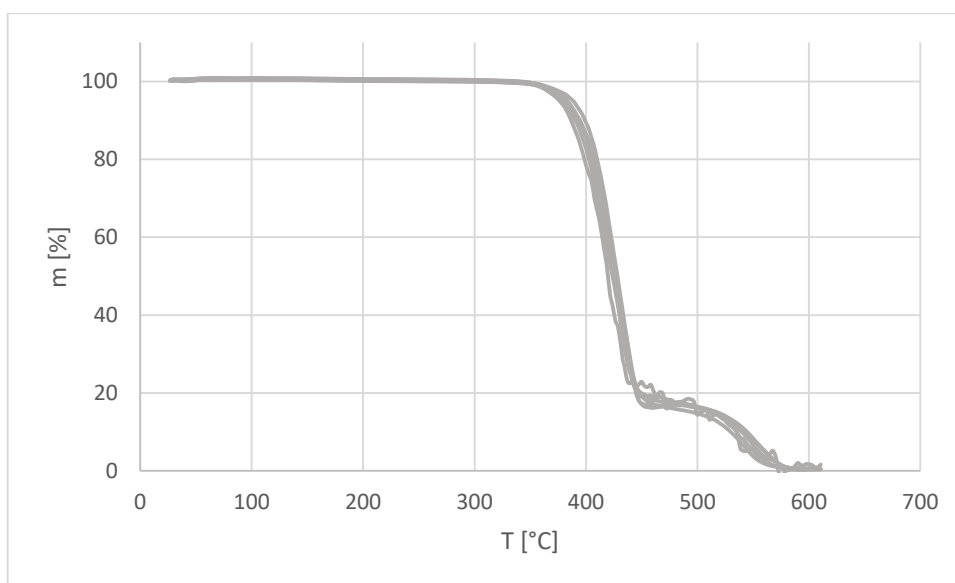
Obr. 35: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě pro materiály obsahující PET v dusíku

Tab. 7: Procentuální zbytek materiálů obsahujících PET po tepelné degradaci v atmosféře dusíku

Materiál	Zbytek hmotnosti [%]
100PETčirý	14,29
30PETčirý	15,04
100PETbar	14,93
30PETbar	15,06
PETpan	14,42
100směs	14,39

Na Obr. 35 jsou stejné křivky, avšak měřené v atmosféře vzduchu. Všechny křivky mají velmi podobný tvar a vzájemně se překrývají. K prvnímu dramatickému poklesu hmotnosti dochází mezi teplotami cca 390 až 460 °C, poté je úbytek minimálně a k dalšímu výraznějšímu úbytku dochází při teplota cca 510 °C. Nicméně vliv přídavku recyklátu se neprojevil.

Po tepelné degradaci v atmosféře vzduchu byl průměrný zbytek hmotnosti okolo 0,5 %, tedy téměř vše degradovala do formy plynu (Tab. 8).



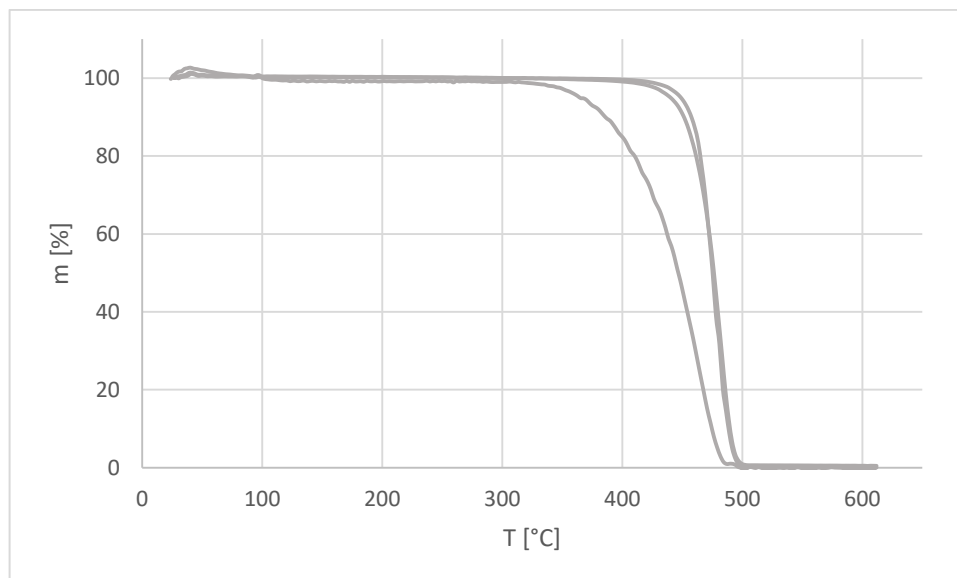
Obr. 36: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě pro materiály obsahující PET na vzduchu

Tab. 8: Procentuální zbytek materiálů obsahujících PET po tepelné degradaci v atmosféře vzduchu

Materiál	Zbytek hmotnosti [%]
100PETčirý	0,40
30PETčirý	0,36
100PETbar	0,66
30PETbar	0,46
PETpan	1,63
100směs	0,46

### 5.5.2 Tepelná degradace materiálů obsahujících HD-PE

Na Obr. 37 jsou křivky tepelné degradace v dusíkové atmosféře materiálů HD-PE. Lze pozorovat, že k výraznému úbytku hmotnosti dochází v případě panenského HD-PE a 100% recyklátu kolem teploty 450 °C a při teplotě 500 °C nezůstává prakticky žádný zbytek. Tyto dvě křivky jsou shodné a překrývají se. V případě 30% přídavku recyklátu počíná degradace dříve, a to už při 370 °C a při teplotě 500 °C již také nezůstávají žádné nebo téměř žádné zbytky (Tab. 9). Tato dřívější degradace se dá těžko vysvětlit, může být způsobena chybným měřením a bylo by dobré experiment zopakovat.

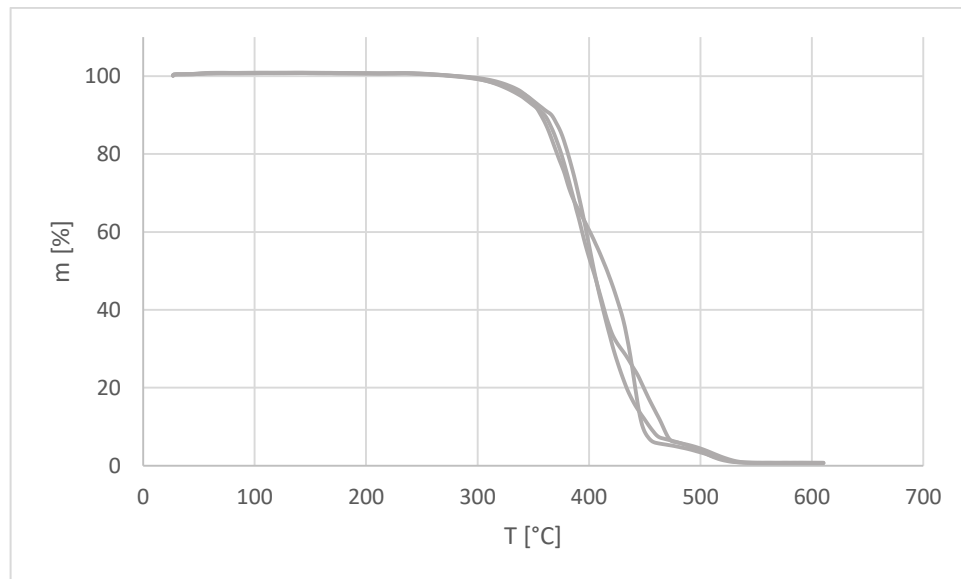


Obr. 37: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě pro materiály obsahující HD-PE v dusíku

Tab. 9: Procentuální zbytek materiálů obsahujících HD-PE po tepelné degradaci v atmosféře dusíku

Materiál	Zbytek hmotnosti [%]
30PE	0,00
100PE	0,47
PEpan	0,04

Na Obr. 38 jsou tytéž křivky, avšak měřené v atmosféře vzduchu. Degradací proces zde nastává dříve, již při cca 330 °C, a trvá delší dobu. Kolem teploty 530 °C již nezůstává žádný nebo téměř žádný zbytek (Tab. 10). Křivky jsou si velmi podobné a vzájemně se překrývají, výrazný vliv přídavku recyklátu tedy na tepelnou degradaci nebyl pozorován.



Obr. 38: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě pro materiály obsahující HD-PE na vzduchu

Tab. 10: Procentuální zbytek materiálů obsahujících HD-PE po tepelné degradaci v atmosféře vzduchu

Materiál	Zbytek hmotnosti [%]
30PE	0,67
100PE	0,75
PEpan	0,00

## ZÁVĚR

Cílem práce bylo připravit regranulát z vytríděných plastů pocházejících z použitých nápojových PET lahví. Byly tedy připraveny 100% regranuláty PET a HD-PE, dále směsi 30 % recyklátu a panenského materiálu a také 100% regranulát celé PET láhve bez třídění jednotlivých částí, včetně etiket. Tyto materiály pak byly testovány různými technikami a získané vlastnosti byly srovnány s panenskými materiály.

Pomocí indexu toku taveniny a stanovením viskozitní křivky pro HD-PE bylo zjišťováno reologické vlastnosti. Bylo zjištěno, že zpracovatelnost recyklátu i směsi je velmi dobrá a není tedy překážkou pro následné použití recyklátů z hlediska výroby nových produktů.

Bylo zjištěno, že velká část vlastností srovnávaných materiálů se od sebe výrazně neliší. Většinu mechanických vlastností měly průměrně nejlepší panenské materiály, avšak s relativně velkou odchylkou, tudíž by bylo potřeba optimalizovat metodiku měření. Nicméně lze vyvodit, že mechanické vlastnosti recyklátů i jejich směsí jsou v zásadě dobré a neměly by být překážkou pro jejich opětovné použití v dalších výrobcích.

Pomocí DSC byly zjištěny teploty tání a krystalizace, které se od sebe také příliš nelišily. Pouze 100% recyklát čiré PET vykazoval relativně nižší hodnoty než ostatní materiály, avšak ne nijak významně. U směsi HDPE měl nejnižší hodnotu také 100% recyklát. Tepelná odolnost tedy zůstává téměř zachována.

Pomocí termogravimetrické analýzy bylo zkoumáno degradační chování materiálů. Bylo zjištěno, že recyklací ani přidavkem recyklátu se degradační chování nijak výrazně neovlivní.

Vlastnosti směsi HD-PE, PP a PET se nijak výrazně nelišily od vlastností ostatních směsí PET.

Podle výsledků této práce lze konstatovat, že vlastnosti „post consumer“ recyklátů PET a HD-PE jsou velmi dobré, jen o velmi málo horší než u panenských materiálů, a jsou tedy vhodné pro opětovné použití.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Eurostat [online], [cit. 2022-05-17] dostupné z <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20211027-2>.
- [2] Eur-Lex [online], [cit. 2022-05-17] dostupné z <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>.
- [3] DUCHÁČEK, V. *Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. Praha: Roberto VŠCHT v Praze, 2006. 278 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [4] PEACOCK, A. J., CALHOUN, A. *Polymer Chemistry: Properties and Applications*. Munich: Hanser, 2006. 397 s. ISBN 978-1-56990-397-1.
- [5] NISTICÒ, R. Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry [online]. 2020 [cit. 2022-04-20]. ISSN 0142-9418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707>.
- [6] SELKE, S. E. M., CULTER, J. D. *Plastics Packaging: Properties, Processing, Applications, and Regulations*. 3. vyd. Munich: Hanser, 2016. 487 s. ISBN 978-3-446-40790-9.
- [7] KHALID, M. Y., ARIF, Z. U., AHMED, W., ARSHAD, H. Recent trends in recycling and reusing techniques of different plastic polymers and their composite materials. *Sustainable Materials and Technologies*. [online]. 2022 [cit. 2022-05-03]. ISSN 2214-9937. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00382>.
- [8] RAJU, F. *Recycling of Polymers: Methods, Characterization and Applications*. Weinhei: Wiley, 2016. 288 s. ISBN 978-3-527-33848-1.
- [9] RUDOLPH, N., KIESEL, R., AUMNATE, C. *Understanding Plastics Recycling: Economic, Ecological, and Technical Aspects of Plastic Waste Handling*. Munich: Hanser, 2017. 117 s. ISBN 978-1-56990-676-7.
- [10] DEMETRIOUS, A., CROSSIN, E. Life cycle assessment of paper and plastic packaging waste in landfill, incineration, and gasification-pyrolysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. [online] 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00842-4>.
- [11] SHEN, L., WORRELL, E. *Handbook of Recycling*. Norwich: Elsevier, 2014. 600 s. ISBN 9780123964595.

- [12] NIAOUNAKIS, M. Recycling of flexible plastic packaging. Norwich: Elsevier, 2019. 466 s. ISBN 978-0-12-816335-1.
- [13] JIANG, J., SHI, K., ZHANG, X., YU, K., ZHANG, H. From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*
- [14] Davidson, M. G., Furlong, R. A., McManus, M. C. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste – A review. *Journal of Cleaner Production*. [online] 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126163>.
- [15] RAGAERT, K., DELVA, L., VAN GEEM, K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*. [online]. 2017 [cit. 2022-05-10]. ISSN 0956-053X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>.
- [16] GHOSH, A. Performance modifying techniques for recycled thermoplastics. *Resources, Conservation and Recycling*. [online] 2021 [cit. 2022-05-20]. ISSN 0921-3449. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105887>.
- [17] SABU, T., AJAY, V. R., KRISHNAN, K., ABITHA, V. K., MARTIN, G. T. Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles. Norwich: Elsevier, 2018. 212 s. ISBN 978-0-12-811361-5.
- [18] AL-SALEM, S. M., LETTIERI, P., BAEYENS, J. The valorization of plastic solid waste (PSW) by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. *Progress in Energy and Combustion Science*. [online]. 2010 [cit. 2022-05-11]. ISSN 0360-1285. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.09.001>.
- [19] Schyns, Z. O. G., Shaver, M. P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromolecular Rapid Communication*. [online] 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/marc.202000415>.
- [20] Frączak, D. Chemical Recycling of Polyolefins (PE, PP): Modern Technologies and Products. *Waste Material Recycling in the Circular Economy - Challenges and Developments* [online]. Londýn: IntechOpen, 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/chapters/77881> doi: 10.5772/intechopen.99084.
- [21] KUNWAR, B., CHENG, H. N., CHANDRASHEKARAN, S. R., SHARMA, B. K. Plastics to fuel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [online]. 2016 [cit. 2022-05-20]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.015>.

[22] ČSN ISO 37, Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – Stanovení tahových vlastností, Zlín: Institut pro testování a certifikaci, 2019.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

HDPE Vysokohustotní polyetylen

PET Polyetylentereftalát

PP Polypropylen

UV Ultrafialové

PE Polyetylen

LDPE Nízkohustotní polyetylen

LLDPE Lineární nízkohustotní polyetylen

Obr. Obrázek

Tab. Tabulka

g Gram

cm Centimetr

např. Například

PVC Polyvinylchlorid

NIR Near infra red

PA Polyamid

SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Aluminosilikát

H<sub>2</sub> Molekula vodíku

CO<sub>2</sub> Oxid uhličitý

CO Oxid uhlenatý

CH<sub>4</sub> Metan

NaOH Hydroxid sodný

mm Milimetr

ITT Index toku taveniny

min Minuta

ISO International Organization for Standardization

l	Litr
pH	Potential hydrogen
30PETčirý	Směs 30% recyklátu čirého polyethyltereftalátu
100PETčirý	Směs 100% recyklátu čirého polyethyltereftalátu
30PETbar	Směs 30% recyklátu barevného polyethyltereftalátu
100PETbar	Směs 100% recyklátu barevného polyethyltereftalátu
PETpan	Panenský polyethyltereftalát
30PE	Směs 30% recyklátu vysokohustotního polyetylenu
100PE	Směs 100% recyklátu vysokohustotního polyetylenu
PEpan	Panenský vysokohustotní polyetylen
100směs	Směs polyethyltereftalátu, vysokohustotního polyetylenu a polypropylenu
°C	Stupně Celsia
s	Sekunda
t	interval odřezávání
°	Stupeň
X <sub>c</sub>	Krystalinita
I <sub>c</sub>	Krystalická fáze
I <sub>a</sub>	Amorfní fáze
ml	Mililitr
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxid křemičitý
μl	Mikrolitr
ln	Přirozený logaritmus
η	Viskozita
γ	Smyková rychlost
ČSN	České technické normy
E	Modul pružnosti

---

MPa	Megapaskal
N	Newton
$\theta$	Úhel theta
a. u.	Bezrozměrná jednotka
Tg	Teplota skelného přechodu
Tm	Teplota tání
Tc	Teplota Krystalizace
Cp	Tepelná kapacita
T	Teplota
m	Hmotnost
J	Joule

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1: Vzorec PET [2].....	11
Obr. 2: Vzorec polypropylenu [4].....	12
Obr. 3: Vzorec polyetylenu [4].....	13
Obr. 4: Řetězce HDPE [4].....	13
Obr. 5: Řetězce LDPE [4].....	14
Obr. 6: Řetězce LLDPE [4].....	14
Obr. 7: Tvar zkušebního tělesa [14].....	26
Obr. 8: Toková křivka materiálů HD-PE (shora: 100PE, 30PE, PEpan).....	30
Obr. 9: Modul pružnosti materiálů obsahujících PET.....	31
Obr. 10: Maximální napětí materiálů obsahujících PET.....	31
Obr. 11: Mez pevnosti materiálů obsahujících PET.....	32
Obr. 12: Protažení při přetržení materiálů obsahujících PET.....	33
Obr. 13: Modul pružnosti HD-PE materiálů.....	33
Obr. 14: Protažení při přetržení HD-PE materiálů.....	34
Obr. 15: Maximální napětí HD-PE materiálů.....	35
Obr. 16: Krystalinita materiálů obsahujících PET.....	36
Obr. 17: Záznam rentgenové difrakce materiálů obsahujících PET (shora: 100směs, 100PETčirý, 30PET čirý, PETpan, 100PETbar, 30PETbar).....	36
Obr. 18: Krystalinita materiálů HD-PE.....	37
Obr. 19: Záznam rentgenová difrakce materiálů HD-PE (shora: 30PE, 100PE, PEpan)....	37
Obr. 20: Teploty tání materiálů PET v průběhu prvního ohřevu (tmavé sloupce jsou hodnoty materiálu nevysušeného a světlé vysušeného).....	39
Obr. 21: Endotermy prvního ohřevu materiálů PET (shora: PETpan vysušený, PETpan, 100PETčirý vysušený, 100PETčirý, 30PETčirý vysušený, 30PETčirý, 100PETbar vysušený, 100PETbar, 30PETbar vysušený, 30PETbar).....	40
Obr. 22: Teploty krystalizace materiálů PET v průběhu ochlazování (tmavé sloupce jsou hodnoty materiálu nevysušeného a světlé vysušeného).....	41

Obr. 23: Exotermie chlazení materiálů PET (shora: PETpan vysušený, PETpan, 100PETčirý vysušený, 100PETčirý, 30PETčirý vysušený, 30PETčirý, 100PETbar vysušený, 100PETbar, 30PETbar vysušený, 30PETbar).....	42
Obr. 24: Teploty tání materiálů PET v průběhu druhého ohřevu (tmavé sloupce jsou hodnoty materiálu nevysušeného a světlé vysušeného).....	43
Obr. 25: Endotermie druhého ohřevu materiálů PET (shora: PETpan vysušený, PETpan, 100PETčirý vysušený, 100PETčirý, 30PETčirý vysušený, 30PETčirý, 100PETbar vysušený, 100PETbar, 30PETbar vysušený, 30PETbar).....	44
Obr. 26 Teploty tání materiálů HD-PE v průběhu prvního ohřevu .....	45
Obr. 27: Endotermie prvního ohřevu materiálů HD-PE (shora: 30PE, 100PE, PEpan).....	46
Obr. 28: Teploty tání materiálů HD-PE v průběhu ochlazování .....	46
Obr. 29: Exotermie krystalizace materiálů HD-PE (shora: 30PE, 100PE, PEpan).....	47
Obr. 30: Teploty tání materiálů HD-PE v průběhu druhého ohřevu .....	47
Obr. 31: Endotermie druhého ohřevu materiálů HD-PE (shora: 30PE, 100PE, PEpan).....	48
Obr. 32: Endotermie prvního ohřevu směsi 100 (nahore: vysušená, dole: nesušená).....	49
Obr. 33: Exotermie krystalizace směsi 100 (nahore: vysušená, dole: nesušená) .....	50
Obr. 34: Endotermie druhého ohřevu směsi 100 (nahore: vysušená, dole: nesušená) .....	50
Obr. 35: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě pro materiály obsahující PET v dusíku	51
Obr. 36: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě pro materiály obsahující PET na vzduchu .....	52
Obr. 37: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě pro materiály obsahující HD-PE v dusíku .....	54
Obr. 38: Úbytek hmotnosti v závislosti na teplotě pro materiály obsahující HD-PE na vzduchu.....	55



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1: Přehled materiálů určených k dalšímu použití .....	23
Tab. 2: Přehled vytvořených směsí a čistých materiálů.....	24
Tab. 3: Výsledky Indexu toku taveniny směsí HD-PE .....	29
Tab. 4: Teploty a tepla tání a krystalizace směsí PET .....	38
Tab. 5: Teploty a tepla tání a krystalizace směsí HD-PE .....	44
Tab. 6: Teploty a tepla tání a krystalizace směsí materiálů .....	49
Tab. 7: Procentuální zbytek materiálů obsahujících PET po tepelné degradaci v atmosféře dusíku.....	52
Tab. 8: Procentuální zbytek materiálů obsahujících PET po tepelné degradaci v atmosféře vzduchu.....	53
Tab. 9: Procentuální zbytek materiálů obsahujících HD-PE po tepelné degradaci v atmosféře dusíku.....	54
Tab. 10: Procentuální zbytek materiálů obsahujících HD-PE po tepelné degradaci v atmosféře vzduchu .....	55

