

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ  
PRÁCE**

**2017**

**DANIEL  
KRATEJL**

# Tokové vlastnosti tavenin polymerů

## Flow properties of polymer melts

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHALOR THESIS

Ing. JAN SKOČILAS, Ph.D  
VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Měření tokových vlastností tavenin a polymerů vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze, dne 15. 8. 2017

.....  
Daniel Kratejl

# Abstrakt

Tato práce se zabývá reologickými vlastnostmi tavenin polymerů a popisuje jejich chování pomocí mocninového modelu. Obsahuje databázi polymerů a kompozitů, ve které se nachází potřebné parametry k popisu tokových vlastností. Databáze obsahuje převážně přírodní plniva, poskytující v dnešní době vhodnější variantu k plnivům anorganickým.

Dále je zde teoretická studie popisující chování polypropylenu při extruzi. Na základě teoretické studie bylo zkonstruováno měřicí zařízení, které měří tlakovou ztrátu pomocí dvou tlakových snímačů v jednoduché obdélníkové kapiláře, která je připojena ke vstřikovacímu lisu. Jedná se o in-line kapiláru, která velmi dobře napodobuje skutečné průmyslové zpracování taveniny. Parametry mocninového modelu lze stanovit z experimentálních dat tlakové ztráty a průtoku, které lze získat z měřicího zařízení.

## Klíčová slova

Polymery, kompozity, extruze, mocninový model, nenevtonské kapaliny, tokové vlastnosti, tlaková ztráta

# Abstract

This thesis deals with rheological properties of polymer melts and describes their behavior using the power law model. It contains a database of polymers and composites, which includes the necessary parameters for describing flow properties. The database mainly contains organic fillers, which provides more suitable alternative to inorganic fillers in these days.

Then there is a theoretical study of the polypropylene behavior during extrusion. A measuring device, based on the theoretical study, was designed to measure the pressure drop with two pressure sensors in a simple rectangular die, which is connected to the injection molding machine. It is an in-line die that simulates the real melt processing industry very well. The parameters of the power law model can be determined from the experimental data of pressure losses and flow, which can be obtained from the measuring device.

## Keywords

Polymers, composites, extrusion, power law model, non-newtonian fluids, flow properties, pressure drop

## Poděkování

Rád bych poděkoval panu doktorovi Janu Skočilasovi za odborné vedení, trpělivost a cenné rady při vypracování této bakalářské práce.

# Obsah

Úvod .....	1
1 Základní pojmy .....	2
1.1 Nenewtonovské kapaliny .....	2
1.1.1 Pseudoplastické kapaliny.....	2
1.1.2 Dilatantní kapaliny.....	2
1.1.3 Binghamské kapaliny .....	3
1.2 Reologie.....	3
1.2.1 Tokové jevy.....	4
1.2.2 Mocninový model.....	5
1.2.3 Extruze .....	6
2 Databáze polymerů .....	7
2.1 Čisté polymery.....	7
2.1.1 Polypropylen.....	7
2.1.1.1 Speciální technologie a výrobky z PP.....	8
2.1.1.2 Plastové pěny .....	8
2.1.2 Polyetylen .....	9
2.1.2.1 Polyetylen s nízkou hustotou LDPE .....	9
2.1.2.2 Polyetylen s vysokou hustotou HDPE.....	9
2.1.3 Polykarbonát PC .....	10
2.1.4 Polystyren PS .....	11
2.1.5 Polyvinylchlorid PVC.....	11
2.1.6 Polyamid 6 a 66 .....	12
2.2 Kompozity.....	14
2.2.1 Polypropylen.....	14
2.2.1.1 Polypropylen plněný skleněným vláknem (kužel-deska).....	14
2.2.1.2 Polypropylen plněný skleněnými kuličkami .....	15
2.2.1.3 Polypropylen s jílem .....	15
2.2.1.4 Karbonová vlákna .....	16
2.2.2 Polyetylen s nízkou hustotou LDPE .....	16
2.2.2.1 Přírodní vlákna bavlna, len .....	16
2.2.3 Polyetylen s vysokou hustotou HDPE.....	17
2.2.3.1 Dřevitá moučka .....	17

2.2.3.2	Javorová vlákna .....	18
2.2.4	Polykarbonát .....	18
2.2.4.1	Skleněná vlákna .....	18
2.2.5	Polystyren .....	19
2.2.5.1	Přírodní vlákna konopí, len .....	19
2.2.5.2	Přírodní vlákna agáve .....	19
2.2.5.3	Přírodní vlákna ananas lucidus .....	20
2.2.6	Polyvinylchlorid .....	20
2.2.6.1	Tuhé částice chlorovaného polypropylenu .....	20
2.2.7	Polyamid 6 a 66 .....	21
2.2.7.1	Skleněná vlákna .....	21
2.3	Shrnutí .....	21
3	Návrh měřicího zařízení .....	22
3.1	Výpočet tlakové ztráty .....	22
3.2	Tlakové snímače .....	26
3.3	Vstřikovací jednotka .....	27
3.4	Měřicí zařízení .....	28
3.4.1	Pevnostní kontrola šroubů .....	28
3.5	Shrnutí .....	29
	Závěr .....	30



# Úvod

Polymery představují nedílnou součást moderní doby. Používají se v nespočetném množství aplikací. Od jednoduchých výrobků každodenní potřeby až po výrobky s výbornými mechanickými vlastnostmi, které stále častěji nahrazují ocel a jiné materiály. Jejich obrovskou výhodou jsou nízké zpracovatelské teploty, které umožňují energetickou úsporu.

Měření reologických vlastností polymerů zůstává důležitým vědeckým a technologickým cílem. Vzhledem k tomu, že reologické vlastnosti jsou velmi závislé na složení, teplotě, smykových rychlostech apod., jsou naměřená data použita k návrhu strojů a zařízení zpracovávající polymery nebo při optimalizaci provozních podmínek.

Práce se zabývá literární rešerší s cílem najít tokové vlastnosti základních druhů polymerů a nejčastěji používaných aditiv, které tokové vlastnosti ovlivňují.

V praktické části práce je navrženo jednoduché měřicí zařízení v podobě kapilárního reometru, které je možné připojit na vstřikovací lis ARBURG 270C a měřit tokové vlastnosti vstřikovaného polymeru. Návrh zařízení je proveden pro běžný, průmyslově používaný polypropylen.

# 1 Základní pojmy

## 1.1 Nenewtonovské kapaliny

Převážná většina tavenin polymerů vykazuje nenewtonovské chování. Jedná se o chování, kdy vztah mezi napětím a rychlostí deformace není lineární závislostí.

### 1.1.1 Pseudoplastické kapaliny

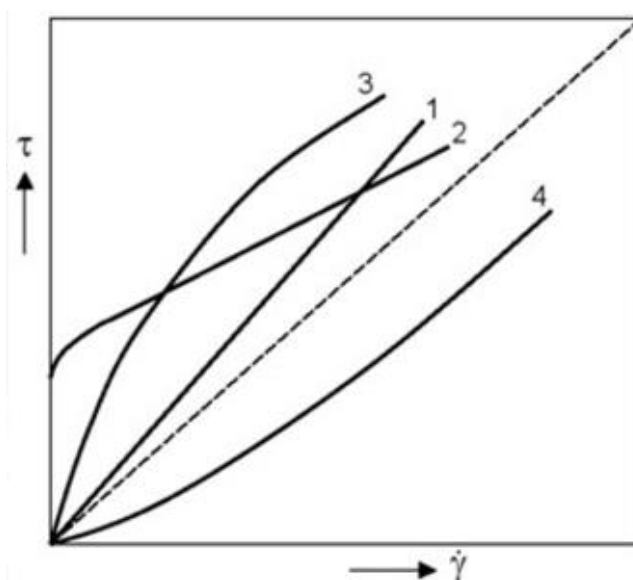
Zdánlivá viskozita těchto kapalin se s rostoucím gradientem rychlosti zmenšuje. Jsou to např. roztoky a taveniny polymerů, roztoky mýdel a některé suspenze. K vyjádření průběhu tokových křivek uvedených nenewtonských kapalin se používají empirické nebo poloempirické rovnice, kde  $K$ ,  $m$  jsou pro mocninový model empirické látkové parametry charakterizující vlastnosti toku nenewtonské kapaliny. Parametr  $K$  se nazývá součinitel (koeficient) konzistence a parametr  $m$  je index (nebo exponent) toku. U pseudoplastických kapalin je  $m$  menší než 1.[22]

### 1.1.2 Dilatantní kapaliny

Kapaliny, u kterých naopak zdánlivá viskozita roste s rostoucím gradientem rychlosti. Takové chování se projevuje ve vysoce koncentrovaných suspenzích a komplikuje technologické procesy. Často se usiluje o potlačení tohoto chování pomocí změny složení. Stejně jako u pseudoplastických kapalin se k vyjádření průběhu tokových křivek používají látkové parametry  $K$ ,  $m$  ( $m > 1$ ). [22]

### 1.1.3 Binghamské kapaliny

Jsou to kapaliny s plastickou složkou deformace, u kterých dochází k toku až po překročení určitého prahového smykového napětí, tzv. meze toku (kluzu). Patří sem např. koncentrované průmyslové a odpadní (splaškové) kaly, kašovitě suspenze křídly a vápna. [2]  
[22]



Obrázek 1: Graf závislosti smykové rychlosti na napětí, 1-newtonská, 2-binghamská, 3-pseudoplastická, 4-dilatantní kapalina [28]

## 1.2 Reologie

Reologie je vědní obor zabývající se vztahem mezi rychlostí deformace a napětím při toku materiálů. Zahrnuje studium materiálů s vlastnostmi popsanými silou a deformací. Viskózní kapalina je kapalina, kde energie potřebná k její deformaci je zcela rozptýlena v procesu deformace. V důsledku se kapalina není schopna zotavit z deformace. Opakem je elastický pevný materiál, který ukládá energii z deformace a po odebrání deformační síly energii opět vrátí.

Viskózní vlastnosti kapalin mohou být charakterizovány viskozitou, která je mírou vnitřního odporu při toku. K udržení toku taveniny je zapotřebí hnací síly, jejíž velikost bude záviset na velikosti makromolekul, molekulové hmotnosti a velikosti mezimolekulárních sil.

Zabývá se hlavně vlastnostmi polymerů. Polymerní taveniny jsou viskoelastické a jejich tokové vlastnosti jsou teplotně závislé. Při popisování reologického chování se nejčastěji používá viskozita určená pomocí měřících přístrojů pro smykovou deformaci. Vyskytují se také polymerní procesy jako například vyfukování nebo zvlákňování. Tyto procesy jsou nejčastěji charakterizovány elongační viskozitou nebo kombinací smykové a elongační deformace. [1]

### 1.2.1 Tokové jevy

V polymerních taveninách se vyskytují jevy, které je odlišují od ostatních kapalin. Základní vlastností toku je neneutronovská viskozita, další pak kombinace smykové a elongačního proudění, kde se projevují elongační vlastnosti materiálu.

V newtonských kapalinách smykové napětí je přímo úměrné smykové rychlosti. Pro tyto látky je viskozita závislá jen na teplotě, ale u většiny tavenin polymerů je viskozita závislá i na rychlosti deformace. Hovoříme o pseudoplastickém chování kapaliny, kdy při vzrůstajícím napětí klesá viskozita. Tento jev se objevuje z toho důvodu, že při vysokých hodnotách napětí jsou molekuly nataženy a uvolněny k tomu, aby mohly po sobě jednodušeji smýkat. Takové chování má za následek snižování viskozity.[1]

Další tokové jevy se mohou dělit podle změny zdánlivé viskozity v závislosti na čase. Průběh křivky viskozity při zvyšování napětí se liší od průběhu při jeho snižování. Tyto kapaliny vykazují v reogramu (závislost napětí na rychlosti deformace) chování ve tvaru hysteretzní smyčky. Rozlišují se dva základní typy:

**Tixotropie**, u které se při konstantní smykové rychlosti s časem napětí snižuje.

**Reopektické chování**, kde při konstantní smykové rychlosti se s časem napětí zvyšuje. Na rozdíl od tixotropie není toto chování příliš časté.

Anomálie viskozity mohou být různé a můžeme se setkat i s různými kombinacemi chování viskózního s elastickým (kapaliny viskoelastické). Do této skupiny kapalin se řadí např. velmi koncentrované suspenze.

Důležité je také, že pro neneutronovské kapaliny nemá pojem viskozity jako látkové konstanty fyzikální význam a je nutno jej nahradit tokovou křivkou v potřebném rozsahu smykových napětí. Vzhledem k možnosti různých anomálií nelze přitom spoléhat na hodnoty získané extrapolací. Údaj zdánlivé viskozity změřený na jednoduchém viskozimetru bez udání smykového napětí nebo rychlostního gradientu může sloužit pouze pro orientační srovnání konzistence neneutronovských kapalin stejného druhu měřené na stejných přístrojích za stejných podmínek. [22]

Dalším jevem u tavenin polymeru je **viskoelastický paměťový efekt**. Při deformaci taveniny polymeru natahováním, stříháním nebo kombinací obou, jsou molekuly polymeru natahovány a uvolňovány. Po deformaci se molekuly snaží zachovat svůj původní tvar, v podstatě si zvykají na svůj nový stav deformace. Je-li deformace udržována po příliš krátkou dobu, molekuly se mohou navrátit do svých původních pozic a tvar taveniny se může vrátit do svého původního stavu před roztavením. V případě dostatečně dlouhé doby deformace se molekuly nemůžou vrátit do svých původních pozic, v podstatě zapomenou svoji původní hodnotu. [1]

## 1.2.2 Mocninový model

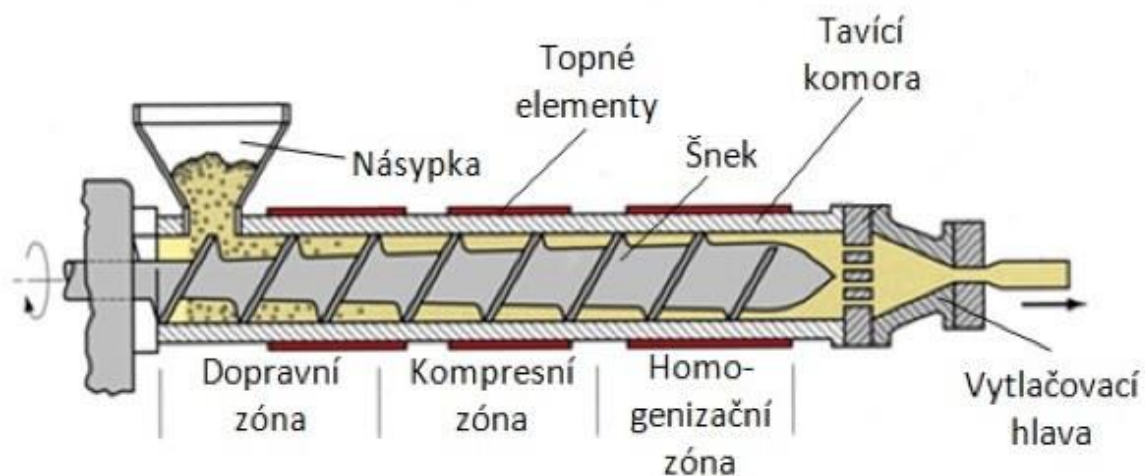
Jedná se o jednoduchý, ale nejvíce používaný model, který byl navržen Ostwaldem a de Waalem. Model obsahuje pouze dva popisující parametry. Přesně prezentuje oblast pseudoplastického chování ve viskozitě závislé na rychlosti deformace. Zanedbává však Newtonovské chování přítomné při malých rychlostech deformace. Mocninový model se zapisuje následovně:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{m-1} \quad 1.1$$

kde  $K [Pa \cdot s^m]$  je koeficient konzistence a  $m [-]$  je index toku. Koeficient konzistence může zahrnovat teplotní závislost viskozity a index toku představuje pseudoplastické chování taveniny polymeru. [1]

### 1.2.3 Extruze

Během extruze je tavenina polymeru protlačována tvarovací kapilárou a formována do profilu požadovaného tvaru. Tento profil může být deska, fólie, trubka aj. První vytlačování termoplastických polymerů bylo provedeno u firmy Paul Troester Maschinenfabrik v německém Hannoveru v roce 1935. Existují dva typy extruze. První z nich je šnekový extruder, který pracuje na principu tlakového gradientu vytvořeného třením pelet proti válci v úseku kde se začíná natavovat polymer a přechodu viskózní polymerní taveniny před šnek extruderu. Druhý je pístový extrudér, kde se začne snižovat objem prostoru s nataveným polymerem, což má za následek nárůst tlaku. [1]



Obrázek 2: Schéma jednošnekového extrudéru [25]

## 2 Databáze polymerů

V další části mojí práce jsem se rozhodl vytvořit databázi polymerů, ve které jsou uvedeny koeficienty pro výpočet reologických vlastností mocninového modelu. Data jsem získával hlavně z odborných článků a knih. Zaměřoval jsem se na nejdůležitější polymery a na polymery s plnivý. Databázi jsem vytvářel získáváním dat z odborných článků. Nejdříve jsem si naskenoval grafické závislosti viskozity nebo napětí na smykové rychlosti. Potom jsem závislosti vložil do programu WebPlotDigitizer, kde jsem definoval prostor grafu a následně vyznačil naměřené body. Získaná data jsem vložil do programu Microsoft Excel a pomocí regresní analýzy jsem získával koeficienty  $K$  a  $m$ .

### 2.1 Čisté polymery

V první části se budu zabývat reologickými vlastnostmi základních polymerů bez plniv. V práci se budu zabývat polymery, se kterými se nejčastěji setkáváme ve zpracovatelském a plastikářském průmyslu. Bude to polypropylen, polyethylen, polykarbonát, polystyren, polyvinylchlorid, polyamid 6 a 66.

#### 2.1.1 Polypropylen

Polypropylen je částečně krystalický polymer. Stupeň krystalinity výrazně ovlivňuje vlastnosti polypropylenu. Se zvyšující se krystalinitou roste modul pružnosti, mez kluzu a pevnost v ohybu, chemická odolnost, klesá rázová houževnatost. Polypropylen je vysoce chemicky odolný (kyseliny, zásady), ale má nižší odolnost vůči rozpouštědlům. Vyznačuje se dobrými elektroizolačními vlastnostmi.

PP má nasákavost pod 0,1%, granulát tedy nemusí být ve výrobním závodě balen do speciálních obalů. Také nemusí být předsoušen před zpracováním, je minimalizováno nebezpečí vzhledových vad a zhoršení mechanických vlastností dílu zapříčiněných vlhkostí materiálu. Malá energetická náročnost, při zpracování propylen vyžaduje nízké zpracovatelské teploty. Má také výbornou teplotní stabilitu při zpracování a dlouhou výdrž při zpracovatelské teplotě. Vyznačuje se odolností proti smykovému namáhání, proto je možné využívat vysoké otáčky šneku při zpracování. [1] [6]

### 2.1.1.1 Speciální technologie a výrobky z PP

Autor Guo-Bao Jin [4] uvádí ve své práci, že s vývojem mikro technologií se stále více klade důraz na vývoj mikro produktů. Nejdůležitějším prvkem v procesu výroby mikrovláken je vytlačovací kapilára, a proto se jejich vývoji věnuje největší pozornost. Kapilára o malém vnitřním průměru a dlouhé délce má několik nevýhod. Největší nevýhodou je velmi vysoký tlak v průtokovém kanálu kapiláry. V důsledku toho bude průtok polymeru v oblasti hlavy značně omezen. Další nevýhodou je, že dlouhá délka může vést k mechanickým deformacím a může ztížit výrobní proces.

Pro experiment byl použit polypropylen (T30S) s hustotou  $0,9 \text{ g/cm}^3$ . Objemový tok v kapiláře ovlivňuje průměr a tloušťku stěny kapiláry. Čím menší je objemový tok, tím menší je průměr a tloušťka stěny. Smyková viskozita se snižovala se zvyšující se teplotou při konstantní smykové rychlosti. Koeficient konzistence a rozdíl tlaků se snižoval se zvyšující teplotou. Dále se ukázalo, že teplota kapiláry nemá podstatný vliv na vyráběné mikrovlákno. [4]

### 2.1.1.2 Plastové pěny

Autor Pongprapat Piyamanocha [8] se zabývá danou problematikou, protože polypropylen nachází stále častější uplatnění v oblasti medicíny. Může za to především jeho biokompatibilita, odpovídající tuhost a rázová houževnatost, výborná chemická odolnost a sterilizovatelnost v kombinaci s přijatelnou cenou. Většina produktů z čistého PP je připravována v pevné formě spíše než ve formě pěn. Je náchylný k tenkým lomům částí během zpracování a praskání bublin. Jako vhodná modifikace se jeví využití komerčně dostupného polypropylenu s vysokou pevností taveniny (HMS) PP. Nevýhodou tohoto materiálu je jeho vysoká cena a hledají se řešení pomocí mísení těchto materiálů. V této práci byly použity dva druhy polymerů a to lineární vysokomolekulární (HMW) a rozvětvený (HMS) polypropylen. Oba typy PP byly smíchány v různých koncentračních poměrech, což umožnilo optimalizaci výsledného materiálu pro přípravu polymerních pěn.

Pro experimenty byly použity dva typy polypropylenu od společnosti Borealis Polyolefine Rakousko. První z nich byl lineární HMW typ (BE52), druhý potom rozvětvený HMS typ (Daploy WB130HMS). Jejich směsi HMW/HMS 3/7 a HMW/HMS 7/3 v hmotnostních % byly připraveny na dvoušnekovém vytlačovacím stroji Brabender TSE



20/40 (Brabender GmbH & Co. KG, Německo). Pro účely dalších experimentů byly takto připravené směsi vylišovány do desek o tloušťce 1 mm.

Smyková viskozita byla stanovena pomocí kapilárního reometru (Rosand RH7-2, Malvern Instruments, Velká Británie) modifikovaného zařízením pro regulaci protitlaku, umožňujícím tak určení tlakově závislého tokového chování viskozity. Pro určení tlakově závislé smykové viskozity polymerní taveniny byly použity kapiláry o průměru 1 mm s poměrem délky a průměru (L/D) 20 a 0,14. Zdánlivá smyková viskozita byla určena v rozsahu rychlostí smykových deformací od 35 do 3500 s<sup>-1</sup> při teplotě 210 °C. [8]

## 2.1.2 Polyetylen

Existují dva typy polyetylenů. Polyetylen s lineárním řetězcem označován jako LPE nebo i HDPE (vysokohustotní), který vzniká koordinací polymerací za nízkého tlaku. Polyetylen s rozvětveným řetězcem označován jako rPE nebo i LDPE (nízkohustotní), který vznikne radikálovou polymerací za vysokého tlaku. [23]

### 2.1.2.1 Polyetylen s nízkou hustotou LDPE

Je složen z dlouhých řetězců molekul (obvykle s více než 20 atomy uhlíku). To usnadňuje jeho zpracování různými technologiemi. Vyznačuje se poměrně malou tvrdostí, pevností v tahu, odolává velmi dobře vlhkosti. Oproti HDPE má horší odolnost vůči kyselinám a organickým látkám.

Používá se pro předměty denní potřeby, jako jsou šroubové uzávěry a ochranné kryty. V současné době se s velkou oblibou používá na plastové folie pro výrobu nákupních tašek, obalových materiálů a ochranných fólií pro zemědělské účely. [1] [23]

### 2.1.2.2 Polyetylen s vysokou hustotou HDPE

Má vysokou pevnost v tahu, je odolný vůči kyselinám, alkoholům a olejům, dále odolává dlouhodobému zahřívání až do 110°C. Je houževnatý, odolný proti oděru, dobrý izolant a ponechává si své vlastnosti i při velmi nízkých teplotách. Ve srovnání s LDPE vykazuje menší větvení, což má za následek silnější mezimolekulární energie, které zajišťují větší pevnost v tahu. HDPE velmi dobře izoluje a ponechává si své vlastnosti i při velmi nízkých teplotách.

HDPE je netoxický a recyklovatelný a proto je stále více používán jako alternativa k méně ekologicky přijatelným materiálům. Lze ho použít na kontejnery na organický odpad, kartáče, uzávěry lahví, lahve, těsnící lišty, vodovodní potrubí a rozvody plynu.

Hustotu a smršťování částí z PE v procesu vstřikování určuje teplotní historie až do vyjmutí z formy. Díly, které byly ochlazeny, vykazují nízkou krystalinitu a minimální smrštění ve formě, ale také vysokou míru smrštění po vyjmutí z formy způsobenou post-krystalizací při zvýšených teplotách. Výsledkem může být deformace a popraskání způsobené napětím vneseným při chladnutí. Tento problém může být vyřešen nastavením nižšího průtoku taveniny do formy.

Silná molekulární orientace má za následek vtokovou křehkost. Tento efekt lze zmírnit zvýšením teploty taveniny nebo použít jakost materiálu s nejvyšším možným průtokem do formy. [1]

### 2.1.3 Polykarbonát PC

Polykarbonáty jsou vysokomolekulární amorfní technické termoplasty. Vyznačují se kombinací vynikající mechanické odolnosti, sklovité průhlednosti, vynikající rozměrové stálosti, značné tepelné odolnosti a dobrých elektrických vlastností.

Polykarbonát spojuje řadu velmi dobrých vlastností, kterých nebylo dosud souhrnně dosaženo u žádného dalšího typu termoplastů. Je tvrdý, pevný, elastický s vynikající rázovou a vrubovou houževnatostí. Vlastnosti polykarbonátu jsou dosti blízké vlastnostem polymethylmetakrylátu, ale polykarbonát je pevnější a použitelný v širším rozsahu teplot. Tento polymer je vysoce transparentní pro viditelné světlo, disponuje lepší propustností světla než spousta druhů skla.

Jeho mechanické vlastnosti (zejména houževnatost) je možné zesílením skleněnými vlákny ještě zlepšit, takže může téměř nahradit kovový materiál. Je odolný vůči kyselinám, alkoholu, benzínu, tukům a olejům. Louhy tento plast ničí. Je nehořlavý a odolný proti povětrnostním vlivům. Lze ho leštit, obrábět, lepit, svařovat i sbíjet. Tepelná odolnost je až do 135 °C. Křehne při -140 °C. Má velmi nízkou nasákavost a výborné elektrické vlastnosti. Dlouhodobé působení vody nad 60 °C vyvolává destrukci. V průběhu času dochází k barevným změnám (žloutne). Vyšší viskozita taveniny způsobuje obtížnější vstřikování. Má

sklon k vnitřnímu pnutí. Je vhodný pro přesné výstřiky. Používá se na výrobu silně namáhaných dílů např. nábytkového kování a krytů elektrických přístrojů (např. vrtaček). V automobilovém průmyslu se s polykarbonátem setkáme u reflektorů, blinkrů atd. Ve formě průhledných desek se používá jako nerozbitné stavební díly - např. výplně schodišťových zábradlí a pro neprůstřelné zasklívání přepážek. [1] [23]

## 2.1.4 Polystyren PS

Polystyren je tvořen z dlouhých uhlovodíkových řetězců s fenylovou skupinou na každém druhém atomu uhlíku. Polystyren se vyrábí polymerací z monomeru styrenu. [23]

Je to tvrdý, tuhý, křehký a čirý plast, bez chuti a zápachu, má velmi dobré elektrické vlastnosti, nepatrnou nasákavost, dobrou tvarovou stálost. Odolává kyselinám, louhům, alkoholům, tukům, olejům a roztokům solí. Neodolává chlorovaným, alifatickým a aromatickým uhlovodíkům, benzin vyvolává korozi za napětí. Používá se na krabice pro potraviny, vložky do ledniček, kryty svítidel a jejich díly, hračky, bižuterie, kostry cívek a transformátorů pro elektrotechniku. Po zapálení hoří svítivým žlutým plamenem se silným vývinem sazí. Je-li namáhán na ohyb, praská křehkým lomem. Zpracovatelnost je velmi dobrá. Přírodní je zcela čirý a dodává se v široké barevné škále buď jako průhledný nebo neprůhledný.

Teploty taveniny se pohybují od 180 do 280°C. Maximální teplota formy je 80°C. Při vstřikování se musí dbát na dostatečně vysoké teploty a nepříliš vysoké vstřikovací rychlosti. Špatně nastavené parametry mají za následek namáhání a snižují dlouhodobou kvalitu vyráběných dílů. [1]

## 2.1.5 Polyvinylchlorid PVC

PVC je pevný, těžký, středně silný amorfni materiál. Má vysokou tuhost, elasticitu, ale nízkou odolnost proti abrazivním vlivům a nízkou odolnost proti nárazu. Provozní teploty jsou velmi nízké, dlouhodobě výdrž pouze do 65°C. Má výborné elektrické vlastnosti v oblasti nízkého napětí. PVC je odolný proti většině kyselin, alkoholu, benzínu, minerálním olejům a tukům. Je to poměrně účinný zpomalovač hoření. V závislosti na typu polymerace je průsvitný až průhledný, ale často se zabarvuje do široké škály barev. Plniva u PVC se často používají jen jako výplň a nikoliv výztuž. Nejčastější použití PVC je na potrubí a profily.

V tomto případě je plněno křídou pro zlepšení vlastností. Zvyšuje vrubovou houževnatost, zlepšuje tepelnou stabilitu.

Extruze se nejčastěji provádí od 170 do 200°C. Při zpracování se musí dbát velká pozornost na možnost přehřátí, proto se teploty formy pohybují od 30 do 50°C. Důležité je navrhnout šneky a formy pro ideální tokové podmínky, aby nevznikaly zóny, kde se přerušuje tok taveniny. [1]

## 2.1.6 Polyamid 6 a 66

PA jsou semikrystalické materiály s krystalickým podílem do 40 %. Makromolekuly polymerů (PA 6, PA11) obsahují pouze jednu základní jednotku. Čísla v názvu polyamidů udávají počet atomů uhlíku v základní jednotce. Existují také polyamidy (PA 46, PA 66), které se skládají ze dvou základních jednotek a čísla v názvu udávají počet atomů uhlíku v každé jednotce. Jsou silně polární, a proto i silně navlhavé. V dokonale suchém stavu jsou tuhé, ale křehké, teprve po nabytí rovnovážné vlhkosti (2 až 3 %) se stanou velmi houževnaté a tažné s výraznou mezí kluzu a také odolné proti otěru. Mají nízký součinitel tření, a to i za sucha. Houževnatost ztrácejí při teplotě pod -20 °C. Elektrické vlastnosti jsou podprůměrné. Odolávají většině organických rozpouštědel (alifatickým, aromatickým i chlorovaným uhlovodíkům, esterům, ketonům), tukům, olejům a slabým zásadám, neodolávají kyselinám, silným zásadám a fenolům, peroxidu vodíku, ozonu, UV záření a povětrnosti. Zdravotně jsou nezávadné. Vyrábí se z nich např. kluzná ložiska a ložiskové klece, ozubená kola, kladky a jejich závěsy, řemenice, ozubené převody přístrojů, drobné strojní součásti, např. excentry, vačky, přítlačné válečky textilních strojů, tělesa lamp pro horníky, těsnící prvky, uzávěry benzinových nádrží automobilů, kování k oknům, plastové šrouby a vruty, ze spotřebního zboží struhadla a sítko. PA/GF (polyamidy se skleněnými vlákny) se používají na kryty a tělesa elektrických přístrojů, jako jsou vrtačky, pily, brusky apod. Jsou hořlavé, hoří v plamenu, za tvorby bublin, tavenina odkapává a táhne vlákno, po oddálení z plamene zhasne. Plamen je modrý se žlutým okrajem, zplodiny hoření páchnou po spálené rohovině nebo spálených vlasech. Zpracovatelnost je velice dobrá, tavenina se vyznačuje vysokou tekutostí, ale tuhne velmi rychle v úzkém teplotním rozmezí. Barvitelnost hmoty je dobrá, výrobky jsou neprůhledné.

Polyamid lze využívat u všech standardních metod pro zpracování termoplastů. Granulát musí být před zpracováním důkladně vysušen. PA má velmi nízkou viskozitu taveniny, a proto je nutné u vstřikování použít uzavírací trysky. Pro vstřikování do formy se zpracovávají na teplotu 250-300 °C. U vytlačování se používá nižších tlaků a nižších teplot (100-200 °C). Tímto způsobem mohou být vyrobeny silnostěnné součásti s váhou až 1000 kg.

Polyamidy měknou při zvýšených teplotách, proto jsou často k dostání až s 50 % plniv. Přítomnost karbonových a jiných vláken zvyšuje pevnost a modul pružnosti. Oxid křemičitý, mastek nebo skleněné kuličky zvyšují tuhost a snižují smrštění a deformace. Přidáním 1-2 objemových procent jílových nanokompozitů má za následek 25-50% snížení pronikavosti kyslíku do polymeru, zatímco jen mírně snižuje odolnost proti propíchnutí. Kovové prášky hliníku, mědi, bronzu, oceli, olova, zinku nebo niklu vytvoří elektricky vodivý materiál. [1]

	Hustota ( $mg \cdot m^{-3}$ )	Youngův modul (GPa)	Pevnost v tahu (MPa)	Tažnost (%)	Teplotní roztlačnost ( $10^{-6} K^{-1}$ )	Teplota tání (°C)	Tepelná vodivost ( $W m^{-1} K^{-1}$ )
PP	0,900	1,0-1,4	20-40	300	110	170	0,2
HDPE	0,94-0,97	1-1,1	22-31	1200	59	130-137	0,46-0,5
LDPE	0,92-0,94	0,1-0,3	8,3-34	800	100-220	80-115	0,34
PS	1,05	2,8-3,5	44	2	209	210-220	0,123
PVC	1,25	2,2-2,6	40-45	20	460-800	280-310	0,2
PC	1,196	2,3	121	85	39	233	0,18
Polyamid 66	1,21-1,24	2	80	200	70	263	0,24-0,35

Tab. 1: Základní mechanické a termofyzikální vlastnosti polymerů [1]

Polymer	Koeficient konzistence $K$ [Pa·s <sup>m</sup> ]	Index toku $n$ [-]	Teplota $T$ [°C]	Napětí $\tau_w$ [kPa] ( $\dot{\gamma} = 1000 \text{ s}^{-1}$ )
HDPE	$2.0 \cdot 10^4$	0.41	180	340
LDPE	$6.0 \cdot 10^3$	0.39	160	89
Polyamid	$6.0 \cdot 10^2$	0.66	290	57
PC	$6.0 \cdot 10^2$	0.98	300	522
PP	$7.5 \cdot 10^3$	0.38	200	103
PS	$2.8 \cdot 10^4$	0.28	170	193
PVC	$1.7 \cdot 10^4$	0.26	180	102

Tab. 2: Tokové vlastnosti polymerů [1]

## 2.2 Kompozity

Pro zlepšení vlastností je snaha přidávat do polymerů plniva. V dnešní době se trend více zaměřuje na plniva organická, kvůli jejich obnovitelnosti a snadné recyklovatelnosti. Klasická anorganická plniva jsou, ale stále nejčastějšími plnivy polymerů. Ve své práci se budu zabývat skleněnými vlákny, kuličkami a karbonovými vlákny. Z organických jsem vybral dřevěnou moučku, dřevěná vlákna, sisal, curaua vlákna, len, bavlnu, konopí.

### 2.2.1 Polypropylen

#### 2.2.1.1 Polypropylen plněný skleněným vláknem (kužel-deska)

Autor S. F. Bush [9] se ve své práci zabývá PP plněným skleněným vláknem. Skleněná vlákna zvyšují pevnost, ale také viskozitu, což je z reologického hlediska nežádoucí. Nemají tendenci se vyrovnávat ve směru toku taveniny v důsledku jejich délky. Dochází k přičení jednotlivých vláken o další vlákna.

V experimentech je podíl skleněných vláken 3 nebo 6 objemových procent. Délka vláken je 5 mm a průměr je 17  $\mu\text{m}$ . Měření bylo provedeno pomocí rotačního viskozimetru (kužel/deska). Byly použity 2 materiály: homopolymer propylenu (Targor 1100L MFI 6.0) polypropylen-polyethylen (Targor 2300SC MFI 6) při teplotě 230°C.

V tomto experimentu se potvrdilo klasické chování tavenin polymerů. S přidáváním plniv narůstal koeficient konzistence a klesal index toku. Vzhledem k tomu, že experiment probíhal na rotačním viskozimetru (kužel/deska) je patrné, že koeficienty konzistence nabývají velmi nízkých hodnot, zatímco indexy toku jsou velmi vysoké oproti kapilárním viskozimetrům. Z toho je patrné, že srovnávání dat z těchto zařízení není možné. [9]

### 2.2.1.2 Polypropylen plněný skleněnými kuličkami

Skleněné kuličky se vyrábějí z borokřemičitanového skla, jejich průměr je 7-8  $\mu\text{m}$ . Obsah plnění se pohybuje mezi 10-50 %. Jejich použití má vliv na zvýšení rázové houževnatosti, pevnosti v ohybu a tvrdosti, snížení smrštění.

Na rozdíl od použití krátkého skleněného vlákna je rozdíl mezi smrštěním ve směru toku taveniny a kolmo na směr toku výrazně menší, což má vliv na menší deformace dílů. Díky této vlastnosti se skleněné kuličky používají jako náhrada skleněného vlákna, případně jako kombinace se skleněným vláknem. Pozitivní vliv na smrštění je však za cenu nižších mechanických vlastností výsledného dílu. [6]

### 2.2.1.3 Polypropylen s jílem

Jíl je směsný přírodní materiál, který je složený z jemně zrnitých minerálů. Díky přiměřenému obsahu vody vykazuje plastické vlastnosti a po vysušení ztvrdne. Je to materiál levný, hojně se vyskytující, mající strukturu vhodnou k přípravě nanokompozitů s termoplasty.

**Montmorillonit** – je složitý hlinitikřemičitanový jílový minerál. Montmorillonitové silikátové vrstvy mají vysoký poměr délka/tloušťka (tloušťka jeden nanometr, délka stovky nanometrů).

Pro získání nejlepších vlastností těchto kompozitů je výhodné mísit taveninu polypropylenu a jílu ve dvoušnekovém extrudéru s připojením na vstřikování vody. Voda pomáhá s vytlačováním nejčastěji dvěma způsoby. Prvním způsobem je, že se roztaví a smísí PP s jílem zároveň a poté je vstříknuta voda. Ve druhém způsobu se nejdříve roztaví PP a poté je vstříknuta vodný roztok s jílem.

Při pokusu byl použit PP s hustotou  $0,91 \text{ g/cm}^3$ . Sušen byl při  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  po dobu 8 hodin ve vakuu. Vysušené pelety propylenu byly roztaveny a smíchány s jílem ve dvoušnekovém extrudéru o průměru 15 mm a 45 L/D poměru. Podíl jílu byl 6wt% a byl smísen s polypropylenem dvěma způsoby.

V prvním případě (PP-C) byl PP s jílem v tavenině se vstřikovanou vodou. Aby se mohly vytvořit dobře spojené PP/jílové nanokompozity, dávka vody se vstříkne pomocí pístového

čerpadla do dvoušnekového extrudéru a odstraní se ve vakuu pomocí průchodu na konci extrudéru.

Relativní komplexní viskozita PP-C je velmi blízko PP bez přísad. V tomto případě přidání plniva v podobě jílu zvyšuje viskozitu. Zvýšená viskozita byla způsobena zvětšenou plochou povrchu na fázovém rozhraní, interakce mezi PP jílového plniva. Zlepšily se také mechanické a termofyzikální vlastnosti daného materiálu. V tomto případě se více osvědčil způsob smíchání roztoku s jílem s taveninou PP a extruze za velmi vysoké rychlosti. [3]

#### 2.2.1.4 Karbonová vlákna

Autor Boronat [10] se ve své práci zaměřil na karbonové nanotrubičky a nanovlákna, která jsou velmi často používanými výztužkami polymerů. Materiály s těmito aditivami mají vysokou elektrickou vodivost, vynikající mechanické vlastnosti a vynikající stabilitu při vysokých teplotách.

V experimentech je podíl karbonových vláken 0,2; 1; 3; 5; 10; 20. Měření bylo prováděno za pomoci pístového extrudéru při 500 ot/min při 210°C a 220°C. Poměr L/D šneku byl 10, 20 a 30. Základní polymer byl použit Moplen HP561s (Basell Polyolefins). Byl mísen s tenkými karbonovými trubičkami Nanocyl-7000.

Materiál s plnivem vykazoval vyšší viskozitu než bez plniv. Přidání plniv způsobilo významné změny v reologickém chování. Materiály s vyšším procentem plniv by byly pro průmyslové zpracování prakticky nepoužitelné, díky jejich vysoké viskozitě. Karbonové trubičky měly mnohem větší viskozitu než karbonová vlákna. Tento rozdíl je způsoben větším povrchem trubiček. Pokud je potřeba materiál s vysokou tepelnou stálostí a výbornými mechanickými vlastnostmi, je lepší použít vyšší procento karbonových vláken, které poskytují stejně dobré mechanické vlastnosti jako karbonové trubičky, ale jsou díky své nižší viskozitě, jednodušší ke zpracování. [10]

### 2.2.2 Polyetylen s nízkou hustotou LDPE

#### 2.2.2.1 Přírodní vlákna bavlna, len

Autor Steller [11] se ve své práci zabývá přírodními vlákny, které mají mezi plnivem velmi důležitou roli, protože spojují vlastnosti polymerů a přírodních vláken. Nejčastěji se přírodní



plniva používají ve formě krátkých vláken. Využívají se pro vytvrzení a zpevnění. Spolu jejich přidáváním se také zvyšuje viskozita a elasticita.

Pro pokus byl použit Malen E (nízkohustotní polyetylen) s bavlněným a lněným plnivem. Obsah plniv byl 10, 20 a 30%. Smísení bylo prováděno vmícháváním krátkých přírodních vláken do taveniny polymeru za teploty 160°C. Měření bylo prováděno na kapilárním viskozimetru při třech různých teplotách (150, 165, 180°C).

V tomto případě je vidět, že se zvýšením obsahu vláken se snižuje index toku a zvyšuje se koeficient konzistence. Efekt teploty na konstanty je přesně opačný než u plniv. [11]

## 2.2.3 Polyetylen s vysokou hustotou HDPE

### 2.2.3.1 Dřevitá moučka

Autor Carrino [14] pracoval ve své práci s polymery s příměsí dřeva, které jsou v nynější době na vzestupu a jejich důležitost a popularita se začíná zvyšovat. Představují obnovitelné a nízkonákladové plnivo, které zlepšuje mechanické vlastnosti jako je tuhost a pevnost. Další výhodou při přidávání dřevitě moučky do polymeru je spojení vzhledu dřeva se stálostí polymeru. Tyto kompozity jsou často vyráběny s vysokým obsahem plniva (50 hm. %).

Použité materiály byly HDPE Eraclen BC 82, dřevitá moučka Fiber-Plast 75 a Fusabond E100, který je zde pouze v malém množství a slouží ke spojení polymeru s plnivem. V experimentu byly použity kompozity s plnivem 20, 30, 40 a 50% hm. Průměr kapiláry byl 35 mm a poměr L/D šneku byl 40:1 a měření bylo prováděno při různých teplotách (160-190°C). Rozsah smykových rychlostí se pohyboval od 1 do 1000 s<sup>-1</sup>. Rychlost šneku byla 120 ot · min<sup>-1</sup>. Moučka byla sušena při 90°C po sobu 24 hodin.

U HDPE s dřevitou moučkou se s přidáváním plniva zvyšuje viskozita a s tím i koeficient konzistence K a index toku n se snižuje. Zvyšující se teplota má opět zcela opačný efekt. Dřevitá moučka představuje při vyšším plnění hrozbu pro kvalitu povrchu výlisků, kterou zanechává potřhanou a s dírami. Tento jev je pravděpodobně zapříčiněn malými rozměry přidávaných částic. [14]

### 2.2.3.2 Javorová vlákna

Autor Wolcott [12] se zabývá HDPE v dřevěnými vlákny, které také představují vhodnější alternativu k plnivům anorganickým. Kompozity s dřevěnými vlákny se často musí vyrábět s velkým procentem plnění kvůli získání požadovaných vlastností. Komerční produkty často obsahují až 60% hm. plniv, proto je důležité zkoumat jejich tokové vlastnosti.

Javorová moučka byla sušena na 2% vlhkosti při 95-100°C. Procento plniva při experimentu se pohybovalo od 30 do 70%, byl prováděn za stejné teploty 180°C a rozsah smykových rychlostí se pohyboval od 1 do 500 s<sup>-1</sup>. Pro získání dat byl použit kapilární rheometr Acer 2000 o průměru 20 mm a délce 320 mm.

U vysokohustotního polyethylenu s javorovými vlákny se s vyšším obsahem plniva zvyšuje koeficient konzistence a snižuje se index toku. Při obsahu plniva 70% už je viskozita tak vysoká, že je materiál pro průmyslové zpracování zcela nevhodný. Změna smykové rychlosti podstatně neovlivňuje chování taveniny, to ukazuje, že deformační schopnost dřeva usnadňuje zpracování, na rozdíl od anorganických částic, které jsou výrazně ovlivňovány změnami smykové rychlosti. [12]

## 2.2.4 Polykarbonát

### 2.2.4.1 Skleněná vlákna

Autor Moon [16] se zabýval polykarbonátem plněným skleněnými vlákny, protože v dnešní době je stále větší tlak na zmenšování dílčích tloušťek a zlehčování mobilních produktů jakou jsou notebooky a mobilní telefony. Za účelem kompenzace snížené tloušťky obalů se musí zlepšovat mechanické vlastnosti polymerů, proto se musí do polymerů přidávat plniva. Předpokládá se, že se tento trend bude dále prohlubovat, a proto je nutné zjišťovat chování těchto tavenin a měření jejich viskozit.

V této studii byl použit viskozimetr štěrbinový připojený ke vstřikolisu. Použitý polymer byl LUPOY GN2403F – LG Chemical. Je to polykarbonát komerčního typu se 40% hm. skleněného vlákna. Je často používán v krytech počítačů díky svým ohybovým vlastnostem.

Ke vstřikování byl použit stroj Battenfeld 75, ke kterému bylo připojeno měřící zařízení. Měření bylo prováděno v rozmezí teplot od 290 do 320°C v rozmezí smykových rychlostí od 100 do 10 000 s<sup>-1</sup>.

U polykarbonátu se skleněnými vlákny bylo zkoumáno pouze jedno plnění (40% hm.), ale za různých teplot a při dvou geometriích měřící komory. Se zvyšující se teplotou opět klesá koeficient konzistence a zvyšuje se index toku. Důležitým poznatkem je, že viskozita měřená na kruhové geometrii je o 8-17 % vyšší než u geometrie obdélníkové. To může být zapříčiněno velmi nepřesným měřením nebo použitím špatného modelu pro vyhodnocení dat z obdélníkové kapiláry. [16]

## 2.2.5 Polystyren

### 2.2.5.1 Přírodní vlákna konopí, len

Autor Steller [11] se zabýval efektivním způsobem recyklace zpěňovaného polystyrenového odpadu. Pro pokus byl použit polystyrenový odpad s konopným a lněným plnivem. Obsah plniv byl 10, 20 a 30%. Smísení bylo prováděno vmícháváním krátkých přírodních vláken do taveniny polymeru za teploty 180°C. Měření bylo prováděno na kapilárním viskozimetru při třech různých teplotách (170, 190, 210°C).

Polystyren s přírodními vlákny je velmi závislý na teplotě, se zvyšováním teploty se dramaticky snižuje viskozita. Při plnění lnem se podle očekávání zvyšuje koeficient konzistence a snižuje se index toku, ale při plnění konopím je chování konstant stejné, ale změny jsou o hodně výraznější. Při plnění konopím z 30% hm. nelze uvažovat o průmyslovém využití. [11]

### 2.2.5.2 Přírodní vlákna agáve

Autor Nair [17] se zaměřuje na začlenění krátkých přírodních vláken do polymerů a následné zjišťování jejich reologických vlastností.

Použitý materiál byl Polystron 678 SF-1 a jako plnivo byly použity sisalová vlákna. Vlákna byla vyčištěna a nasekána do požadované délky 6 mm, poté byly sušeny při teplotě 70 °C. Kompozity obsahovaly 10, 20 a 30% hm. sisalového vlákna a měření probíhalo na reometru Instron 3211 při konstantní teplotě 180 °C. Poměr délky k průměru kapiláry byl 40:52 (L:D).

Polystyren se sisalovými vlákny ukazuje, že s přidáváním plniv koeficient konzistence snižuje, ale index toku zůstává prakticky stejný. To může být zapříčiněno zvýšenou interakcí vláken a molekul polymeru a také skluzem na stěně díky orientaci vláken ve směru toku taveniny. Používání sisalových vláken u polystyrenu se zdá být velmi výhodné. [17]

### 2.2.5.3 Přírodní vlákna ananas lucidus

Při tomto experimentu se autor Borsoi [15] snaží o recyklaci zpěňovaného polystyrenu. Vlákna plniva byla nařezána na délku 2,5 cm, propláchnuta destilovanou vodou po dobu jedné hodiny a vysušena při 70 °C po dobu 12 hodin. Průměr vláken byl 73 μm. Obsah plniv byl 20%, rozsah smykových rychlostí se pohyboval od 100-4000 s<sup>-1</sup> a teplota byla konstantních 190 °C. U recyklovaného zpěňovaného polystyrenu se jeho recyklací snižuje pevnost v tahu, zvyšuje tepelnou degradaci a zanechává deformace ve vnitřní stavbě, které vedou k hrubému povrchu materiálu. Jako plnivo do tohoto materiálu byly curaua vlákna, které naopak opět zvýšily pevnost v tahu a modul pružnosti. Při konstantní teplotě se s přidáním vláken koeficient konzistence zvýšil a index toku se mírně snížil. Změny nebyly nijak výrazné, ani při plnění z 20% hm. [15]

## 2.2.6 Polyvinylchlorid

### 2.2.6.1 Tuhé částice chlorovaného polypropylenu

Autor Peng [21] plnivy snižujícími viskozitu, které tím zlepšují zpracovatelnost polymeru. Tato plniva zároveň přispívají u PVC ke zvýšení tvrdosti, zatímco pevnost v tahu se nesnižuje.

V této studii byl jako plnivo použit chlorovaný polypropylen CPP (Xinzhou chemical factory). Jako základní materiál byl použit PVC komerční kvality TH-400 (Tianjin chemical factory). Pro přípravu směsí byl použit vysoko rychlostní mixér, kde byly obě sloučeniny mixovány po několik minut a potom byly extrudovány jednošnekovým extrudérem s poměrem L/D rovným 25. Extruze probíhala za teploty 170°C.

Polyvinylchlorid s částicemi chlorovaného polypropylenu vykazuje s přidáváním plniv snižující se koeficient konzistence a zvyšující se index toku. I přes snižování viskozity s přidáváním plniv je viskozita stále velmi vysoká. Jejeho snížení bychom dosáhli zvýšením teploty a smykových rychlostí. [21]

## 2.2.7 Polyamid 6 a 66

### 2.2.7.1 Skleněná vlákna

Autor Gibson [13] prováděl experimenty s polyamidem 66 (ICI Maranyl 690) plněného skleněným vláknem z 50% hmotnosti. Průměr kapiláry měřícího zařízení byl 2 mm a měření bylo prováděno při 285°C. Rozsah smykových rychlostí se pohyboval od 100 do 10 000 s<sup>-1</sup>.

Polyamid 66 se vyznačuje velmi nízkými koeficienty konzistence a potřebou zpracování za vyšších teplot než u ostatních polymerů. Přidáním 50% hm. skleněných vláken nepříliš zvýšilo koeficient konzistence a snížilo index toku. Přidáním 50% hm. dlouhých skleněných vláken jsou vidět patrnější rozdíly ve velikosti obou konstant. [13]

## 2.3 Shrnutí

Z výsledků je patrné, že tokové vlastnosti polymerů velmi závisí na druhu jednotlivého polymeru (druhu výrobce). Dále nelze porovnávat tokové vlastnosti polymerů při různých smykových rychlostech, kde se jednotlivé výsledky také velmi liší. Studie ukazuje, že pro každý vyráběný polymer musí být provedena samostatná experimentální studie jeho tokových vlastností. Z Přílohy č. 1 je patrné rozdílných vlastností jednotlivých polymerů bez plniv. Za předpokladu konstantní smykové rychlosti bude energeticky nejvíce náročné extrudovat PC a nejméně náročné Polyamid 66.

U kompozitů už srovnání polymeru s různým procentuálním naplněním je možné. Zpravidla se s rostoucím procentem plniv zvyšuje koeficient konzistence a klesá index toku. Objevují se však i výjimky, kde chování může být opačné, jedná se především o organická plniva. Všechna tato chování jsou patrná z Přílohy č. 1.

## 3 Návrh měřícího zařízení

Reologické vlastnosti polymerů hrají velmi důležitou roli v polymerovém inženýrství. Taveniny polymerů vykazují viskózní i elastické chování, ale klíčovou vlastností je smyková viskozita a její závislost na smykové rychlosti. Deformační vady jako jsou smršťování a propady budou mít významný dopad na rozměrovou přesnost a trvalou rozměrovou stabilitu. Numerická simulace umí předložit předpovědi založené na spolehlivých datech a v dnešní době pomáhá snižovat tato rizika. Bohužel numerická simulace je kriticky závislá na schopnosti modelu viskozity předpovídat chování materiálu v rozsahu smykových rychlostí, teplot a tlaků, které se během procesu vyskytly. Je stále důležité experimentálně zjišťovat tokové vlastnosti polymerů pro přesnější modelování procesů, jejich optimalizaci a kontrolu kvality. [19] [20]

Obvykle se smykové viskozita a její závislost na smykové rychlosti měří pomocí rotačních nebo kapilárních reometrů. U rotačních reometrů se pro polymerní taveniny používá konfigurace kužele na desce nebo desky na desce. Rotační reometr je schopen poskytovat spolehlivé údaje o viskozitě pouze při malých smykových rychlostech (pod  $10 \text{ s}^{-1}$ ). Kapilární reometr je naopak vhodný pro vysoké smykové rychlosti. Poslední a nejjednodušší možností je přímé připojení kapiláry ke zpracovatelskému zařízení. Obrovskou výhodou tohoto měření je simulace výrobního procesu a díky mísení materiálu také homogenizace taveniny. Geometrie mohou být různé, ale nejčastěji se volí obdélníková nebo kruhová štěrbina. [19]

Pokus bude prováděn pomocí kapiláry s tlakovými snímači připojenými ke vstřikolisu a tavenina do něj bude dopravována pomocí šnekového extrudéru. Výpočet bude prováděn pro polokrystalický polypropylen (Moplen HP501H), jehož reologické údaje byly převzaty z experimentálních měření. Rozhodl jsem se pro polypropylen, protože je jeden z nejatraktivnějších polymerů z hlediska přidávání plniv.

### 3.1 Výpočet tlakové ztráty

Rozměry kapiláry jsem navrhoval dle dispozic vstřikovacího lisu. Podle parametrů stroje byla určena délka (prostor ves stroji), objem dávky a čas potřebný k jejímu vytlačení.

Parametry pro polypropylen byly převzaty z knihy International Plastic Handbook (I. P. H.).  
Všechny následující výpočty jsem prováděl pomocí programu Octave.

### Polypropylen

Parametry polypropylenu a rozměry komory měřícího zařízení:

- $\rho = 900 \frac{kg}{m^3} \dots$  hustota [1]
- $L = 0.07 \text{ m} \dots$  délka
- $W = 0.02 \text{ m} \dots$  šířka
- $H = 0.002 \text{ m} \dots$  výška
- $V = 2.4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \dots$  objem dávky
- $t = 5 \text{ s} \dots$  čas vytlačení dávky
- $K = 7.5 \cdot 10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^2 \dots$  koef. konzistence [1]
- $m = 0.38 \dots$  index toku [1]

Určení objemového toku:

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad 3.1$$

Objemový tok je  $4.8 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}$ .

Vzorec pro tlakovou ztrátu je následující:

$$\Delta p = L \cdot \frac{4 \cdot \tau}{D_H} \text{ [Pa]} \quad 3.2$$

$D_H$  je hydraulický průměr a dosadíme za něj:

$$D_H = \frac{2 \cdot W \cdot H}{W + H} \text{ [m]} \quad 3.3$$

Další ve vzorci je  $\tau$ , což je smykové napětí a dosadíme za něj:

$$\tau = K \cdot \left[ \frac{8 \cdot \bar{u}}{D_H} \cdot \left( b + \frac{a}{m} \right) \right]^m \text{ [Pa]} \quad 3.4$$

Koeficienty  $a$ ,  $b$  jsou korekční součinitele pro obdélníkový otvor měřícího zařízení viz tab. 3.

H/W	a	b
0.00	0.5000	1.0000
0.25	0.3212	0.8182
0.5	0.2440	0.7276
0.75	0.2178	0.6866
1.00	0.2121	0.6766

Tab. 3: Tabulka korekčních součinitelů [18]

Z tabulky jsem, získáním rovnic křivek závislosti koeficientů na poměru výšky a šířky, aproximoval hodnoty koeficientů pro poměr 0.1. Hodnoty koeficientů jsou:

- $a = 0.4236$
- $b = 0.9221$

$\bar{u}$  je střední rychlost toku, která se spočítá následovně:

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{H \cdot W} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad 3.5$$

Výsledný vzorec pro tlakovou ztrátu je:

$$\Delta p = L \cdot \frac{4 \cdot K \cdot \left[ \frac{8 \cdot \frac{\dot{V}}{H \cdot W}}{2 \cdot \frac{W \cdot H}{W + H}} \cdot \left( b + \frac{a}{m} \right) \right]^m}{\frac{2 \cdot W \cdot H}{W + H}} \text{ [Pa]} \quad 3.6$$

$$\Delta p = 0.07 \cdot \frac{4 \cdot 7500 \cdot \left[ \frac{8 \cdot \frac{4.8 \cdot 10^{-6}}{0.002 \cdot 0.02}}{2 \cdot \frac{0.02 \cdot 0.002}{0.02 + 0.002}} \cdot \left( 0.9221 + \frac{0.4236}{0.38} \right) \right]^{0.38}}{\frac{2 \cdot 0.02 \cdot 0.002}{0.02 + 0.002}} \quad 3.7$$

Tlaková ztráta pro tento návrh je 6 297 500 Pa.

Ověříme platnost výpočtu určením Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{\bar{u} \cdot D_H}{\nu} \quad 3.8$$

Kde  $\nu$  je kinematická viskozita a  $\bar{u}$  je střední rychlost proudění. Kinematická viskozita se spočítá ze vztahu:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \left[ \frac{m^2}{s} \right] \quad 3.9$$

Kde  $\eta$  je zdánlivá viskozita a spočítá se podle následujícího vzorce:

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{m-1} \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad 3.10$$

Kde  $\dot{\gamma}$  je rychlost smykové deformace a spočítá se:

$$\dot{\gamma} = \sqrt[m]{\frac{\tau}{K}} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad 3.11$$



Výsledný vzorec pro Reynoldsovo číslo vypadá následovně:

$$Re = \frac{\dot{V} \cdot \frac{2 \cdot W \cdot H}{H \cdot W} \cdot \frac{2 \cdot W \cdot H}{W + H}}{K \cdot \sqrt[m]{\frac{K \cdot \left[ \frac{8 \cdot \frac{\dot{V}}{2 \cdot W \cdot H} \cdot \left( b + \frac{a}{m} \right)}{\frac{H \cdot W}{W + H}} \right]^{m-1}}{K}}} \cdot \rho} \quad 3.12$$

$$Re = \frac{\frac{4.8 \cdot 10^{-6}}{0.002 \cdot 0.02} \cdot \frac{2 \cdot 0.02 \cdot 0.002}{0.02 + 0.002}}{7500 \cdot \sqrt[0.38]{\frac{7500 \cdot \left[ \frac{8 \cdot \frac{4.8 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 0.02 \cdot 0.002} \cdot \left( 0.9221 + \frac{0.4236}{0.38} \right)}{0.02 + 0.002} \right]^{0.38-1}}{7500}}} \cdot 900} \quad 3.13$$

Reynoldsovo číslo vychází **0.0026**. Předpoklady výpočtu jsou správné, pohybujeme se v oblasti laminárního proudění. Tlaková ztráta je **6 297 500 Pa**. Hodnota zdánlivé viskozity je **152.10 Pa · s** a hodnota smykové rychlosti je **537.78 s<sup>-1</sup>**.

## 3.2 Tlakové snímače

Tlakovou ztrátu budeme měřit pomocí tlakových snímačů umístěných od sebe v určité délce. V případě měření tlakové ztráty u taveniny polymeru je potřeba, aby snímač odolal vůči abrazivitě materiálu, vysokým teplotám a byl velmi přesný. Dále jsem při výběru zohledňoval jeho rozměry jako je připojovací délka ke stroji a zda se senzor vejde do měřící cely. Vybral jsem konkrétní snímač *Dynisco PT465XL*, který splňuje všechny potřebné požadavky. Je přímo určený pro měření tlaku polymerní taveniny ve vstřikovacích strojích. Technické údaje viz obr. 4.



Obrázek 3: Tlakový snímač [26]

Výkonostní charakteristiky	
Tlakový rozsah	0 - 3,000 psi, 0 - 5,000 psi, 0 - 7,500 psi, 0 - 10,000 psi, 0 - 15,000 psi, 0 - 20,000 psi, 0 - 30,000 psi
Přesnost:	±0.5% plného rozsahu (FSO)
Opakovatelnost:	±0.2% plného rozsahu
Elektrické charakteristiky	
Konfigurace:	Čtyřramenný Wheatstone můstek s tenz.
Odporové můstky:	Vstup: 345 Ω minimum; Výstup: 350 Ω ±10%
Výstupní signál:	3.33 mV/V ±2.0%
Nastavení nuly:	±10% plného rozsahu
Teplotní charakteristiky:	
Membrána snímače:	
Maximální teplota:	400°C (750°F)
Posunutí vlivem teploty:	<36 psi/100°C (20 psi/100°F)
Montážní moment:	500 inch - lbs. max.
Maximální tlak:	2 x rozsah nebo 35,000 psi, což je méně
Materiál v kontaktu s taveninou:	Inconel 718
Váha:	1.5 lbs.
Napájení:	10 Vdc doporučeno, 12 Vdc max.
Vnitřní kalibrace:	80% rozsahu FSO ±1.0%
Izolační odpor:	1,000 MΩ při 50 Vdc
Elektrická část snímače:	
Posun nuly vlivem teploty:	±0.5% FSO /°F max. (±0.10% FSO/°C)
Posun citlivosti vlivem teploty:	±0.02% FSO/°F max. (±0.04% FSO/°C)

Obrázek 4: Technické parametry tlakového snímače DYNISCO PT465XL[26]

### 3.3 Vstřikovací jednotka

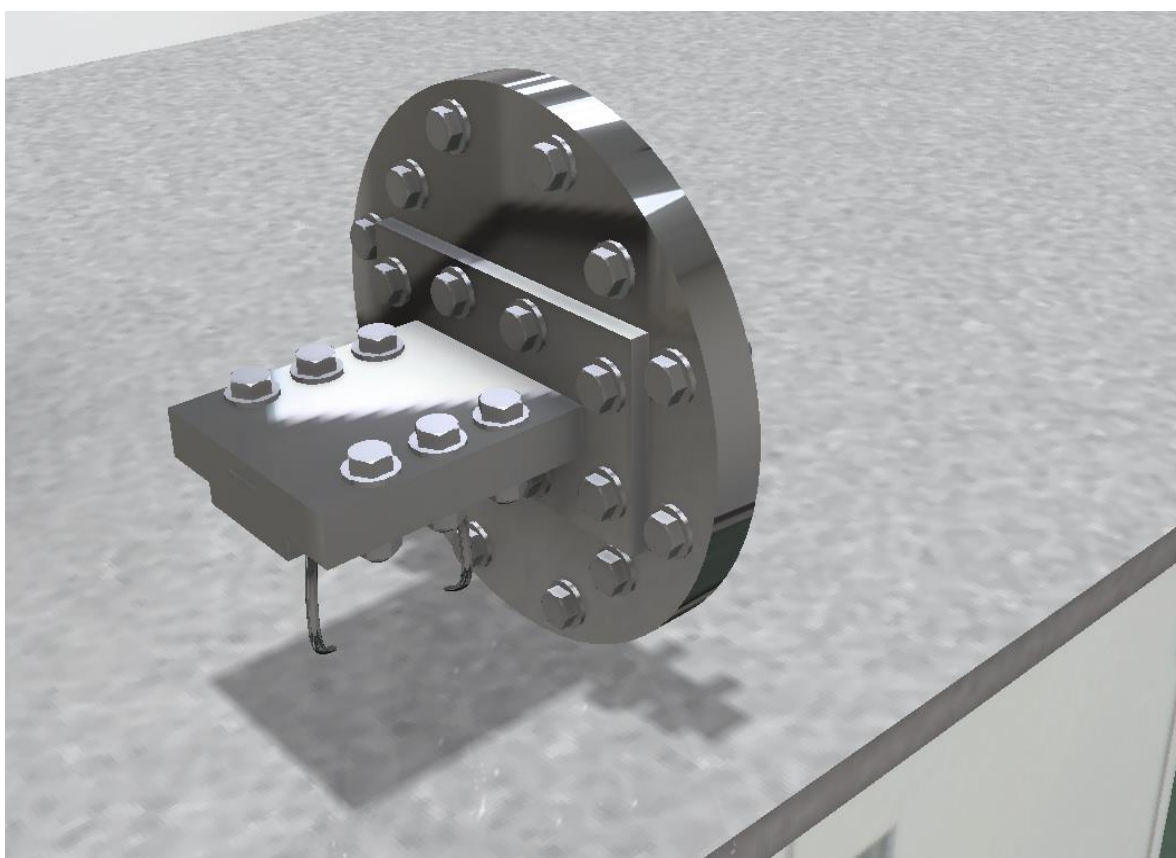
Základní funkcí vstřikovací jednotky určené pro zpracování termoplastů je převedení tuhého polymeru do stavu taveniny a následný přesun taveniny do dutiny vstřikovací formy. Nejrozšířenějším typem určeným pro zpracování termoplastů jsou vstřikovací jednotky se šnekem. Polymer se natavuje pomocí tření vyvolaným otáčením šneku (až 70% tepla) a také pomocí přídavných topných pásků, které jsou umístěny kolem tavící komory. Šnek po natavení požadované dávky polymeru působí jako píst, který vytlačuje taveninu polymeru z komory. Vstřikovací jednotka je složena z několika částí. Násypka tvoří vstupní část, na níž navazuje tavící komora, která je obklopena topnými pásy. Tavící komora je ukončena tryskou, která těsně dosedá na vtokovou vložku vstřikovací formy. [24]



Obrázek 5: Vstřikovací lis ARBURG 270CG 400 [27]

## 3.4 Měřicí zařízení

Podle napočítaných rozměrů měřicí kapiláry, rozměrů tlakových snímačů, připojovacích rozměrů a dispozic stroje jsem navrhl zařízení pro měření tlakové ztráty. Zařízení se skládá ze tří částí. První částí je svařenec, ve kterém jsou připojené tlakové snímače. Druhá část je také svařenec připojený šesti šrouby k prvnímu dílu. Ve druhé části se nachází obdélníkové kapilára. Tato tělesa jsou připojena k přírubě, ve které je dutina nátoku taveniny a dutina pro připojení trysky vstřikovacího lisu. Prostor uvnitř měřícího tělesa bude povrchově upraven leštěním. Příruba se připojuje ke stroji pomocí dvanácti šroubů. Výkres sestavy a kusovník jsou obsaženy v Příloze č. 2 (CD).



Obrázek 6: Model měřícího zařízení

### 3.4.1 Pevnostní kontrola šroubů

Šrouby jsou zatíženy osovou silou a míjivým zatěžováním. Jsou montovány bez předpětí.

Parametry:

- $R_e = 640 \text{ MPa}$  ...mez kluzu
- $p = 40 \text{ MPa}$  ...maximální tlak
- $i = 6$  ...počet šroubů

Kontrola tahového napětí:

$$\sigma_t = \frac{F_A}{A_S} \leq \sigma_{Dt} \quad 3.14$$

Kde  $F_A$  je zatěžující síla šroubu,  $A_S$  je průřez jádra šroubu a  $\sigma_{Dt}$  je maximální dovolené napětí.

Zatěžující síla šroubu:

$$F_A = \frac{p \cdot A_S}{6} \quad 3.15$$

Maximální dovolené napětí pro míjivé zatěžování:

$$\sigma_{Dt} = 0,45 \cdot R_e \quad 3.16$$

$$\sigma_{Dt} = 288 \text{ MPa}$$

Výsledný vztah pro tahové napětí je:

$$\sigma_t = \frac{p}{6} \leq 288 \quad 3.17$$

$$\sigma_t = 6, \overline{66} \text{ MPa}$$

Kontrola vyhovuje.

## 3.5 Shrnutí

Navrhl jsem in-line kapiláru obdélníkového průřezu o rozměrech 70/20/2 (D/Š/V) pro měření tlakové ztráty tavenin polymerů pomocí dvou tlakových snímačů. Měřicí zařízení je připraveno pro připojení ke vstřikovacímu lisu ARBURG 270CG 400 - 70. U zařízení byly provedeny pevnostní kontroly šroubů a byla provedena teoretická simulace, spočítáním tlakové ztráty u taveniny polypropylenu. Měřicí zařízení jsem vymodeloval pomocí programu Autodesk Inventor a vytvořil jsem výkres sestavy s kusovníkem. Kontroly šroubů a teoretické výpočty vyhovují požadavkům pro měření tlakové ztráty.

# Závěr

V teoretické části práce jsem se zaměřil na zkoumání tokových vlastností polymerů. Zkoumal jsem a srovnával taveniny polymerů a kompozitů pomocí mocninného modelu. Zaměřil jsem se hlavně na polymery s organickými plnivými. Ze srovnání je patrné, že všechny polymery a kompozity snižují svoji viskozitu se zvyšující se teplotou a zvyšujícími se smykovými rychlostmi. Přidáváním plniv se viskozita naopak zvyšuje (koeficient konzistence roste a index toku se snižuje). U některých organických plniv se ukázalo, že jejich přidáním se může relativní viskozita i snížit.

V praktické části jsem navrhnul měřící zařízení pro měření tlakové ztráty v obdélníkové kapiláře. Všechny kontroly vyhovují a zařízení by mělo být připravené pro případné použití.

# Zdroje

- [1] OSSWALD, Tim A. *International plastics handbook: the resource for plastics engineers*. [1st ed.]. Cincinnati: Hanser, c2006. ISBN 978-1-56990-399-5.
- [2] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Dot. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-0957-2.
- [3] LEE, Sangmook, Jisoo YOO a Jae Wook LEE. Water-assisted extrusion of polypropylene/clay nanocomposites in high shear condition. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2015, **31**, 317-322 [cit. 2017-05-01]. DOI: 10.1016/j.jiec.2015.07.004. ISSN 1226086x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1226086X15003214>
- [4] JIN, Guo-Bao, Dan-Yang ZHAO, Min-Jie WANG, Yi-Fei JIN, Hui-Qing TIAN a Jian ZHANG. Study on design and experiments of extrusion die for polypropylene single-lumen micro tubes. *Microsystem Technologies* [online]. 2015, **21**(11), 2495-2503 [cit. 2017-05-01]. DOI: 10.1007/s00542-015-2426-6. ISSN 0946-7076. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00542-015-2426-6>
- [5] Reologie tavenin termoplastů v průmyslové praxi. *Katedra strojírenské technologie* [online]. Liberec, 2010 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Reologie.pdf>
- [6] NAVRÁTILOVÁ, Věra. *Materiály na bázi polypropylenu v automobilovém průmyslu* [online]. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: [http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16907/navr%C3%A1tilov%C3%A1\\_2011\\_bp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16907/navr%C3%A1tilov%C3%A1_2011_bp.pdf?sequence=1)
- [7] *Plastic systems* [online]. Sušice, 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/Plast/>
- [8] PONGPRAPAT, P., T. SEDLÁČEK, P. FILIP a P. SAHA. Charakterizace reologického chování směsí HMW-PP/HMS-PP propřípravu plastových pěn. *Chemické listy* [online]. 2014 [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/22688162-Charakterizace-reologickeho-chovani-smesi-hmw-pp-hms-pp-pro-pripravu-plastovych-pen.html>
- [9] BUSH, S. F., F. G. TORRES a J. M. METHVEN. *Rheological characterisation of discrete long glass fibre (LGF) reinforced thermoplastics*. [online]. [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X00000890>

- [10] BORONAT, T., D. GARCIA-SANOQUERA, J. PASCUAL, F. PERIS a L. SANCHEZ-NACHER. Comparative study of the rheological behavior of multiwalled carbon nanotubes and nanofiber composites prepared by the dilution of a masterbatch of polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2012, **126**(3), 1044-1052 [cit. 2017-07-19]. DOI: 10.1002/app.36623. ISSN 00218995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.36623>
- [11] STELLER, Ryszard T. Rheological behavior of polymer melts with natural fibers. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2005, **97**(4), 1401-1409 [cit. 2017-07-27]. DOI: 10.1002/app.21156. ISSN 0021-8995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.21156>
- [12] LI, T. Q. a M. P. WOLCOTT. Rheology of Wood Plastics Melt. Part 1. Capillary Rheometry of HDPE Filled With Maple. *Polymer engineering and science* [online]. 2005 [cit. 2017-08-05]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.20308/full>
- [13] GIBSON, A. G. Die entry flow of reinforced polymers. *Composites* [online]. 1989 [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010436189906836>
- [14] CARRINO, Luigi, Stefano CILIBERTO, Giuseppe GIORLEO a Umberto PRISCO. Effect of filler content and temperature on steady-state shear flow of wood/high density polyethylene composites. *Polymer Composites* [online]. 2011, **32**(5), 796-809 [cit. 2017-08-06]. DOI: 10.1002/pc.21101. ISSN 02728397. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.21101>
- [15] BORSOI, Cleide, Lisete C. SCIENZA a Ademir J. ZATTERA. Characterization of composites based on recycled expanded polystyrene reinforced with curaua fibers. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2013, **128**(1), 653-659 [cit. 2017-08-06]. DOI: 10.1002/app.38236. ISSN 00218995. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.38236>
- [16] MOON, Jong-Sin a Jeong-Moo LEE. Shear viscosity measurement of highly filled polycarbonate melts using a slit-die rheometer. *Korea-Australia Rheology Journal* [online]. 2013, **25**(3), 129-135 [cit. 2017-08-06]. DOI: 10.1007/s13367-013-0013-x. ISSN 1226119x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s13367-013-0013-x>
- [17] NAIR, K. C. M., R. P. KUMAR, S. THOMAS, S. C. SCHIT a K. RAMAMURTHY. Rheological behavior of short sisal fiber-reinforced polystyrene composites. *Composites* [online]. 2000, , 1231-1240 [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X0000083X>
- [18] CHHABRA, R. P. a J. F. RICHARDSON. *Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications*. Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN 978-0-7506-3770-1.



- [19] AHO, Johanna a Seppo SYRJÄLÄ. Shear viscosity measurements of polymer melts using injection molding machine with adjustable slit die. *Polymer Testing* [online]. 2011, **30**(6), 595-601 [cit. 2017-08-11]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2011.04.014. ISSN 01429418. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941811000729>
- [20] GOU, Gang, Pengcheng XIE, Weimin YANG a Yumei DING. Online measurement of rheological properties of polypropylene based on an injection molding machine to simulate the injection-molding process. *Polymer Testing* [online]. 2011, **30**(8), 826-832 [cit. 2017-08-11]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2011.08.005. ISSN 01429418. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941811001279>
- [21] PENG, JIng, Genshuan WEI a Yudong ZHANG. Studies on Mechanical and Rheological Properties of Poly(Vinyl Chloride) Modified with Elastomers and Rigid Organic Particles. *Applied Polymer* [online]. 2002 [cit. 2017-08-12]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.12053/abstract>
- [22] HOLUBOVÁ, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin* [online]. Olomouc, 2014 [cit. 2017-08-12]. Dostupné z: [http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady\\_reologie.pdf](http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady_reologie.pdf)
- [23] *Tiefziehen* [online]. Sušice [cit. 2017-08-12]. Dostupné z: <http://tiefziehen.com/cz/>
- [24] Vstříkovací jednotka. *Publi* [online]. [cit. 2017-08-12]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/03.html>
- [25] Další stroje pro zpracování plastů. *Publi* [online]. [cit. 2017-08-15]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/14.html>
- [26] Tlakové snímače. *Azzur-Technology* [online]. [cit. 2017-08-15]. Dostupné z: <http://www.azzur-tech.cz/produkty/tlakove-snimace-taveniny/pro-vstrikovani/pt-465-xl>
- [27] Vstříkovací stroje. *Arburg* [online]. [cit. 2017-08-15]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/cs/cz/spektrum-sluzeb/vstrikovani/vstrikovaci-stroje/>
- [28] JIROUT, T. *Proudění nenewtonských kapalin potrubím*. 2015.

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Graf závislosti smykové rychlosti na napětí, 1-newtonská, 2-binghamská, 3-pseudoplastická, 4-dilatantní kapalina [28] .....	3
Obrázek 2: Schéma jednošnekového extrudéru [25] .....	6
Obrázek 3: Tlakový snímač [26] .....	26
Obrázek 4: Technické parametry tlakového snímače DYNISCO PT465XL[26] .....	26
Obrázek 5: Vstřikovací lis ARBURG 270CG 400 [27] .....	27
Obrázek 6: Model měřicího zařízení .....	28

## Seznam tabulek

Tab. 1: Základní mechanické a termofyzikální vlastnosti polymerů [1] .....	13
Tab. 2: Tokové vlastnosti polymerů [1] .....	14
Tab. 3: Tabulka korekčních součinitelů [18] .....	23

# Přílohy

## Příloha č. 1: DATABÁZE MATERIÁLŮ

Autor	Materiál	Rozsah smykových rychlostí	K	m	Teplota
		$[s^{-1}]$	$[Pa \cdot s^m]$	[-]	$[^{\circ}C]$
	<b>Polypropylen</b>				
I. P. H.	PP	-	7500	0.38	200
Gibson	PP GWM101	100-10000	4770	0.343	240
Boronat	PP	10-10000	734	0.671	210
Guo-Bao	PP T30S	640-3000	14570	0.221	210
	PP T30S	640-3000	11910	0.23	230
	PP T30S	640-3000	12370	0.219	250
Pongprapat	PP (Polyolefine) lineární HMW	6-400	9061	0.386	210
	PP (Polyolefine) rozvětvený HMS	6-400	2028	0.481	210
	Směs HMW a HMS (30/70%)	6-400	6821	0.399	210
	Směs HMW a HMS (70/30%)	6-400	6410	0.263	210
Bush	PP 1100L	0,01-4	853	0.902	230
	PP 1100L - 3% GF	0,01-4	1413	0.882	230
	PP 1100L - 6% GF	0,01-4	2131	0.835	230
	PP 2300L	0,1-4	942	0.927	230
	PP 2300L - 3% GF	0,1-4	1352	0.883	230
	PP 2300L - 6% GF	0,1-4	2105	0.796	230
Boronat	PP CNT 0,2%	10-10000	1083	0.657	210
	PP CNT 1,0%	10-10000	1363	0.636	210

	PP CNT 3,0%	10-10000	1770	0.619	210
	PP CNT 4,0%	10-10000	2831	0.573	210
	PP CNT 5,0%	10-10000	4017	0.529	210
	PP CNT 10,0%	10-10000	8476	0.444	210
	PP CNT 20,0%	10-10000	17653	0.355	210
	PP CNF 0,2%	10-10000	1000	0.67	210
	PP CNF 1%	10-10000	1252	0.65	210
	PP CNF 3%	10-10000	1403	0.637	210
	PP CNF 5%	10-10000	1577	0.636	210
	PP CNF 10%	10-10000	2018	0.615	210
	PP CNF 20%	10-10000	2935	0.58	210
Gibson	PP (HW60 GR30) 30% GF	100-10000	6226	0.301	240
	<b>HDPE</b>				
I. P. H.	HDPE	-	20000	0.41	180
Wiley	HDPE	100-1000	6190	0.56	180
Wolcott	HDPE (LB-0100)	0,5-170	10077	0.57	180
Carrino	HDPE	1-1000	27403	0.41	160
	HDPE	1-1000	17965	0.412	170
	HDPE	1-1000	11959	0.416	180
	HDPE	1-1000	3944	0.431	190
Wiley	Alathon	100-1000	4680	0.59	200
	DuPont	100-1000	3730	0.61	220
Wolcott	HDPE (LB-0100) - 30% javorových vláken	1-170	19543	0.541	180
	HDPE (LB-0100) - 40% javorových vláken	1-170	26434	0.522	180
	HDPE (LB-0100) - 50% javorových vláken	1-170	42588	0.474	180
	HDPE (LB-0100) - 60% javorových vláken	1-170	63294	0.455	180

	HDPE (LB-0100) - 70% javorových vláken	1-170	99725	0.425	180
Carrino	WPC20 - 20 % dřevité moučky	1-1000	78098	0.328	160
	WPC20 - 20 % dřevité moučky	1-1000	28243	0.329	170
	WPC20 - 20 % dřevité moučky	1-1000	15217	0.332	180
	WPC20 - 20 % dřevité moučky	1-1000	5438	0.344	190
	WPC30 - 30 % dřevité moučky	1-1000	136672	0.229	160
	WPC30 - 30 % dřevité moučky	1-1000	49425	0.23	170
	WPC30 - 30 % dřevité moučky	1-1000	23131	0.232	180
	WPC30 - 30 % dřevité moučky	1-1000	7766	0.241	190
	WPC40 - 40 % dřevité moučky	1-1000	246010	0.16	160
	WPC40 - 40 % dřevité moučky	1-1000	88965	0.161	170
	WPC40 - 40 % dřevité moučky	1-1000	41636	0.163	180
	WPC40 - 40 % dřevité moučky	1-1000	13979	0.168	190
	WPC50 - 50 % dřevité moučky	1-1000	405917	0.112	160
	WPC50 - 50 % dřevité moučky	1-1000	146793	0.113	170
	WPC50 - 50 % dřevité moučky	1-1000	68700	0.114	180
	WPC50 - 50 % dřevité moučky	1-1000	23066	0.118	190

	<b>LDPE</b>				
I. P. H.	LDPE	-	6000	0.39	160
Steller	LDPE (Malen E)	10-1000	17656	0.507	150
	LDPE (Malen E)	10-1000	11445	0.544	165
	LDPE (Malen E)	10-1000	8297	0.584	180
	LDPE (Malen E) - bavlna 10%	10-1000	29563	0.46	150
	LDPE (Malen E) - bavlna 20%	10-1000	39939	0.417	150
	LDPE (Malen E) - bavlna 30%	10-1000	68809	0.356	150
	LDPE (Malen E) - bavlna 10%	10-1000	17718	0.495	165
	LDPE (Malen E) - bavlna 20%	10-1000	28315	0.442	165
	LDPE (Malen E) - bavlna 30%	10-1000	54102	0.378	165
	LDPE (Malen E) - bavlna 10%	10-1000	14952	0.525	180
	LDPE (Malen E) - bavlna 20%	10-1000	18715	0.485	180
	LDPE (Malen E) - bavlna 30%	10-1000	31792	0.427	180
	LDPE (Malen E) - len 10%	10-1000	18704	0.489	165
	LDPE (Malen E) - len 20%	10-1000	31563	0.419	165
	LDPE (Malen E) - len 30%	10-1000	50177	0.366	165
	LDPE (Malen E) - len 10%	10-1000	12267	0.556	180
	LDPE (Malen E) - len 20%	10-1000	19769	0.478	180
	LDPE (Malen E) - len 30%	10-1000	41869	0.387	180
	<b>Polykarbonát</b>				
I. P. H.	PC	-	600	0.98	300

Moon	PC (LUPOY GN2403F) - 40% GF (Kapilára)	100-10000	712	0.733	290
	PC (LUPOY GN2403F) - 40% GF (Kapilára)	100-10000	419	0.767	305
	PC (LUPOY GN2403F) - 40% GF (Kapilára)	100-10000	257	0.8	320
	PC (LUPOY GN2403F) - 40% GF (Štěrbina)	100-10000	562	0.737	290
	PC (LUPOY GN2403F) - 40% GF (Štěrbina)	100-10000	323	0.773	305
	PC (LUPOY GN2403F) - 40% GF (Štěrbina)	100-10000	197	0.806	320
	<b>Polystyren</b>				
I. P. H.	PS	-	28000	0.28	170
Borsoi	PS	100-4000	9654	0.48	190
Nair	PS	1-4000	20230	0.14	180
Steller	PS	10-1000	28680	0.487	170
	PS	10-1000	11220	0.549	190
	PS	10-1000	2314	0.609	210
	PS - konopí 10%	10-1000	49240	0.402	170
	PS - konopí 20%	10-1000	91180	0.307	170
	PS - konopí 30%	10-1000	174900	0.248	170
	PS - konopí 10%	10-1000	15010	0.466	190
	PS - konopí 20%	10-1000	33550	0.395	190
	PS - konopí 30%	10-1000	48230	0.344	190
	PS - konopí 10%	10-1000	5823	0.523	210
	PS - konopí 20%	10-1000	9405	0.501	210
	PS - konopí 30%	10-1000	22610	0.463	210
	PS - len 10%	10-1000	45630	0.408	170
	PS - len 20%	10-1000	77440	0.343	170

	PS - len 30%	10-1000	100050	0.308	170
	PS- len 10%	10-1000	15750	0.479	190
	PS - len 20%	10-1000	20790	0.44	190
	PS - len 30%	10-1000	25320	0.408	190
	PS - len 10%	10-1000	3866	0.55	210
	PS - len 20%	10-1000	6535	0.526	210
	PS - len 30%	10-1000	9615	0.502	210
Borsoi	EPSr (recyk. zpěňovatelný PS)	100-4000	8309	0.53	190
	PFC20 20% curaua vláken	100-4000	11038	0.51	190
	EPFC20 20% curaua vláken	100-4000	13411	0.51	190
Nair	PS U106 10% sisal vláken	1-4000	30886	0.19	180
	PS U306 30% sisal vláken	1-4000	24978	0.19	180
	<b>Polyvinylchlorid</b>				
I. P. H.	PVC	-	17000	0.26	180
Peng	PVC-2% CPP	10-10000	364276	0.37	180
	PVC-8%CPP	10-10000	292273	0.39	180
	PVC-15%CPP	10-10000	248947	0.375	180
	<b>Polyamid 66</b>				
I. P. H.	Polyamid 66	-	600	0.66	290
Gibson	Polyamid 66 (Maranyl A100)	100-10000	62	0.81	285
	Polyamid 66 (Maranyl A690) 50% GF	100-10000	375	0.683	285
	Polyamid 66 (Verton RF- 700-10) 50% LGF	100-10000	1415	0.572	285

## Příloha č. 2: Výkres sestavy a kusovník viz CD