

TOKOVÉ VLASTNOSTI TAVENIN POLYMERŮ  
FLOW PROPERTIES OF POLYMER MELTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

doc. Ing. JAN SKOČILAS, Ph.D.  
VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vejvoda** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **482628**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Tokové vlastnosti tavenin polymerů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Flow properties of polymer melt**

Pokyny pro vypracování:

Experimentálních měření tokových vlastností tavenin polymerů udávají důležité informace pro návrh zpracovatelských strojů. Experimenty budou probíhat na laboratorním extruderu. Budou zjišťovány tokové vlastnosti různých polymerů, ABS, PS, PE, PP, HDPE atd. včetně polymerů s aditivy, jako jsou skleněné nebo uhlíkové kuličky a vlákna. Experimentálně bude zjišťován index toku taveniny. Cíle práce:

- 1) Proveďte literární rešerši zaměřenou na zjišťování tokových vlastností tavenin polymerů.
- 2) Proveďte materiálovou rešerši zaměřenou na zjištění tokových vlastností vybraných tavenin polymerů.
- 3) Proveďte experimenty na extruderu vybaveném reologickou hlavou pro různé druhy polymerů nebo zpracujte data poskytnutá vedoucím práce (dle aktuální pandemické situace).
- 4) Popište metodiku experimentu a způsob vyhodnocení dat a vyhodnoťte data.

Seznam doporučené literatury:

OSSWALD, Tim A. International plastics handbook: the resource for plastics engineers. [1st ed.]. Cincinnati: Hanser, c2006. ISBN 978-1-56990-399-5.  
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.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Jan Skočilas, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **04.06.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jan Skočilas, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma tokové vlastnosti polymerů vypracoval samostatně a s použitím uvedené literatury a pramenů.

V Praze, dne 4.6.2021

.....

Martin Vejvoda

## Poděkování

Děkuji doc. Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za odborné vedení při tvorbě této práce, ochotu vysvětlovat, bezproblémovou a rychlou komunikaci a příjemnou atmosféru v celém procesu.

# Anotační list

**Jméno autora:** Martin

**Příjmení autora:** Vejvoda

**Název práce česky:** Tokové vlastnosti tavenin polymerů

**Název práce anglicky:** Flow properties of polymer melts

**Rozsah práce:** počet stran: 59

počet obrázků: 32

počet tabulek: 13

počet příloh: 0

**Akademický rok:** 2020/2021

**Jazyk práce:** čeština

**Ústav:** Ústav procesní a zpracovatelské techniky

**Studijní program:** Teoretický základ strojího inženýrství

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jan Skočilas, Ph.D.

**Anotace česky:** Tato práce se zabývá reologickými vlastnostmi tavenin polymerů, metodami jejich měření a výpočtů. V experimentální části se zaměřuje na měření a výpočet závislosti smykových napětí na smykových rychlostech pro vybrané materiály.

**Klíčová slova:** reologie, taveniny polymerů, tokové vlastnosti, smykové napětí, smyková rychlost

**Anotace anglicky:** This thesis deals with rheological properties of polymer melts, methods of their measurement and calculations. Furthermore, it focuses on measurement and calculations of relations between shear stress and shear rate for selected polymers.

**Key words:** rheology, polymer melts, flow properties, shear stress, shear rate

# Obsah

Úvod .....	8
1 Rozdělení plastů .....	9
1.1 Typ polymeru .....	9
1.1.1 Reaktoplasty .....	9
1.1.2 Termoplasty .....	9
1.1.3 Elastomery .....	11
1.1.4 Termoplastický elastomer .....	11
1.2 Tvar makromolekul .....	12
1.2.1 Lineární .....	12
1.2.2 Rozvětvené .....	12
1.2.3 Sesíťované .....	13
1.3 Velikost makromolekul .....	13
1.4 Přísady .....	13
1.4.1 Plniva .....	13
2 Reologie .....	15
2.1 Tokové vlastnosti .....	15
2.1.1 Neneutonská viskozita .....	15
2.1.2 Normálové napětí ve smykovém toku .....	16
2.1.3 Elastické efekty .....	16
2.1.4 Elongační viskozita .....	17
2.1.5 Index toku taveniny .....	17
2.1.6 Modely toku čistě viskózních neneutonských látek .....	18
Základní vztahy pro tok mocninové kapaliny obdélníkovou kapilárou ..	19
2.2 .....	19
2.3 Korekce toku .....	20
2.3.1 Bagley .....	20
2.3.2 Rabinowitsch .....	21
3 Reometrie .....	22
3.1 Průtokový viskozimetr .....	22
3.2 Pádový viskozimetr .....	23
3.3 Rotační reometr .....	23
3.4 Kapilární reometr .....	24

4	Reometrická hlava .....	25
5	Experimentální měření .....	26
5.1	Stroj a další nástroje.....	26
5.1.1	Extruder .....	26
5.1.2	Reometrická hlava .....	28
5.1.3	Váha .....	28
5.1.4	Stopky .....	28
5.2	Metodika .....	28
5.2.1	Postup měření .....	28
5.3	Naměřené hodnoty a vyhodnocení.....	30
5.3.1	Liten MB-61 .....	30
5.3.2	Mosten GB-107 .....	35
5.3.3	Scolefin 53-G 10-0 .....	40
5.4	Hustota taveniny .....	46
5.4.1	Návrh zařízení pro měření hustoty polymerů .....	47
5.4.2	Komerční měření hustoty tavenin polymerů .....	48
5.5	Průtok taveniny .....	49
5.6	Plniva .....	50
5.7	Další poznatky z měření.....	50
5.7.1	Odběr vytlačené taveniny .....	50
5.7.2	Magnet.....	51
5.8	Shrnutí výsledků.....	52
	Závěr .....	53
	Seznam použitých symbolů .....	54
	Použité zdroje a literatura.....	55
	Seznam obrázků.....	58
	Seznam tabulek .....	59

## Úvod

Polymery jsou nedílnou součástí naší doby, a to hlavně díky jejich nízkým nákladům, širokému rozsahu vlastností a snadnému zpracování. Využívají se prakticky ve všech průmyslových odvětvích. Extruze polymerů je vysoce energeticky náročná, a proto je znalost jejich vlastností klíčová pro správné dimenzování strojů, procesů a monitorování spotřeby energie a kvality.

Rešerše práce je věnována dělení polymerů podle základních charakteristik a důležitým reologickým vlastnostem plastů, které jsou stěžejní pro vhléd do chování tavenin polymerů při vstřikování.

V experimentální části bude provedeno měření několika vybraných polymerů pro vstřikování za účelem stanovení průběhů smykových napětí v závislosti na smykových rychlostech. Znalost takových údajů, které v materiálových listech často chybí, je podstatnou informací pro navrhování strojů pro zpracování polymerů a nastavení procesů.



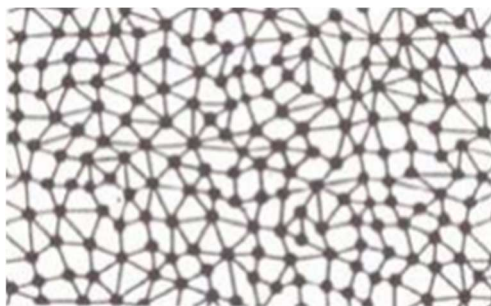
# 1 Rozdělení plastů

## 1.1 Typ polymeru

Základní dělení polymerů souvisí s chováním plastů při nebo nad teplotou tavení. Každá skupina má jinou strukturu, která ovlivňuje její vlastnosti.

### 1.1.1 Reaktoplasty

Reaktoplasty při zahřívání nejdříve měknou a lze je tedy v první fázi tvářet. Při delším zahřívání dochází k chemické reakci, kvůli které vzniká zesíťovaná struktura. Tento proces se nazývá vytvrzování. Zesíťované makromolekuly nelze zpětně uvolnit a přejít tak zpět na taveninu, a proto je tento děj nevratný. Při dalším vyšším zahřívání reaktoplast degraduje a následně dojde ke zničení. Zesíťování způsobuje teplota a tlak při výrobě. Rychlost a hustotu zesíťování lze měnit pomocí aditiv, tzv. síťovací činidla. [1,3,4]



*Obrázek 1 - Struktura reaktoplastů [4]*

Mezi reaktoplasty patří například polyuretan (PUR), který lze vyrobit i jako termoplast nebo elastomer. Připravuje se reakcí isokyanátů s polyalkoholy a pomocí dalších aditiv lze dosáhnout různých vlastností. Nejrozšířenější aplikací polyuretanu je výroba pěnových materiálů – měkké, polotvrdé, tvrdé, integrální pěny. Pěny se využívají pro výrobu matrací, stropních panelů, výplní sedadel, izolací a zdravotnických pomůcek. Z tvrdých pěn se vyrábí například madla a sedačky v hromadných dopravních prostředcích nebo tapetovací válečky. [4]

### 1.1.2 Termoplasty

Struktura termoplastů je tvořena lineárními nebo rozvětvenými makromolekulami, a při jejich zahřátí tak nic nebrání makromolekulám v otáčení. Z toho důvodu nedochází při zahřívání k degradaci jako u reaktoplastů, ale

k měknutí a přechodu do stavu viskózních neneutonských kapalin, kde je lze dále zpracovávat a tvářet. K přechodu zpět do tuhého stavu stačí termoplast ochladit pod teplotu tání (semikrystalické plasty) nebo pod teplotu viskózního toku (amorfní plasty). V tomto cyklu ohřevu a chlazení nedochází k žádné chemické reakci, a proto ho lze opakovat bez omezení. Do této kategorie patří většina veřejnosti známých plastů, jako například polyethylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS), polyvinylchlorid (PVC) nebo polyamid (PA). [3,4]



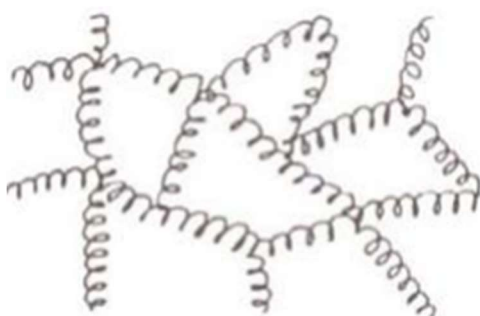
*Obrázek 2 - Struktura semikrystalických termoplastů [4]*

Jedním ze zástupců termoplastů je polyethylen (PE), jehož vlastnosti jsou závislé na molekulové struktuře, a tedy i na způsobu výroby. Dvěma základními druhy jsou vysokohustotní (PE-HD) a nízkohustotní polyethylen (PE-LD). Přednosti polyethylenu jsou v nenavlhavosti, výborných elektroizolačních vlastnostech a odolnosti vůči vodě, kyselinám, zásadám, solím a polárním rozpouštědlům. Jelikož má ale špatné pevnostní charakteristiky, nevyužívá se pro konstrukční aplikace. Před použitím je nutné polyethyleny stabilizovat, jelikož jsou velice citlivé na UV záření. Své využití nachází především jako obalový materiál pro spotřební zboží – fólie, tašky, nádoby, potrubí nebo nádrže. Dále se využívá také pro izolaci kabelů, extruzní povrstvování kartonu (tetrapak), kluzná vedení a ložiska. [4]

Dalším známým termoplastem je polypropylen (PP), který je odolný vůči kyselinám, zásadám, solím a nepolárním rozpouštědlům. Oproti polyethylenu má nižší hustotu, vyšší pevnost, tuhost, tvrdost a odolnost proti oděru, a proto se využívá k výrobě součástí strojů a karosérií aut – nárazníků, spoilerů, reflektorů, mřížek chladičů apod. Je odolný vůči sterilizační teplotě, a proto je využíván i ve zdravotnictví. [4]

### 1.1.3 Elastomery

Elastomery mají, stejně jako reaktoplasty, síťovanou strukturu, která vzniká při delším zahřívání při procesu vulkanizace. Důležitým rozdílem oproti reaktoplastům je jejich makromolekula ve tvaru klubka. Díky této vlastnosti lze materiál opakovaně natahovat bez degradace a plastické deformace. Postupem času může docházet k tzv. tvrdnutí výrobku, kdy se amorfnní struktura částečně mění na krystalickou, a snižuje tak elasticitu. [4]



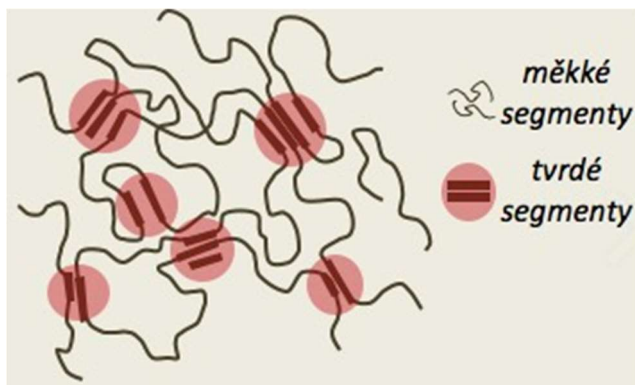
*Obrázek 3 - Struktura elastomerů [4]*

Asi nejznámějším elastomerem je kaučuk, který se před zpracováním jako elastomer nechová, protože je za studena neelastický a za tepla lepivý. Kaučuk tedy musí projít procesem vulkanizace, aby získal elastické vlastnosti. Lze se setkat s přírodním kaučukem, který pochází ze stromu kaučukovníku, a s kaučukem syntetickým. Vzhledem k poměrně nízkým nákladům na výrobu nachází široké uplatnění. Vyrábí se z nich například: pneumatiky, hadice, lepidla, gumová obuv, golfové míčky, střešní izolace. Kaučuky využívané k výrobě těchto produktů nejsou dostatečně odolné vůči olejům, benzínu a teplotě. Proto existují i speciální teplovzdorné a olejovzdorné kaučuky. Tyto odolnější verze se využívají k výrobě neoprenů, zdravotnických implantátů, kontaktních čoček, izolací a ve strojírenství na hadice motorů nebo řemeny a těsnění (gufera a O-kroužky). [4]

### 1.1.4 Termoplastický elastomer

Termoplastické elastomery spojují vlastnosti elastomerů a termoplastů. Materiál má ohebnost a elasticitu elastomerů a zároveň je jednodušeji zpracovatelný a recyklovatelný. Struktura proto obsahuje tvrdé i měkké elastické segmenty, které jsou nemísitelné. Měkké segmenty zajišťují elasticitu. Tvrdé segmenty fungují jako vazba a omezují vzájemnou pohyblivost měkkých segmentů.

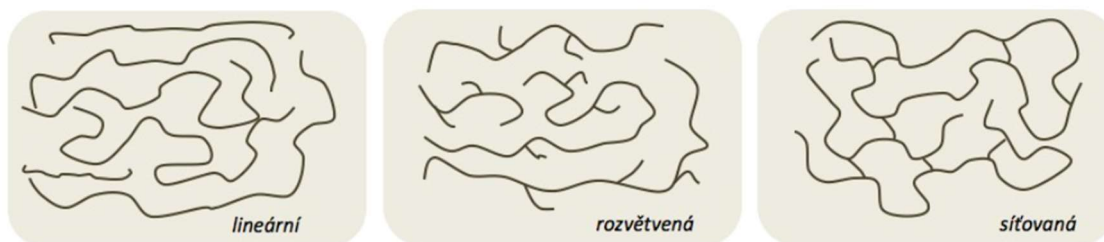
Používají se například na výrobu těsnění, izolací drátů, hadic, protiskluzových úchytů nebo podrážek v obuvnickém průmyslu. [4]



Obrázek 4 - Struktura termoplastických elastomerů [4]

## 1.2 Tvar makromolekul

Polymery se také liší tvarem makromolekul, který ovlivňuje jejich vlastnosti. Tyto tvary jsou tři: lineární, rozvětvené a sesíťované.



Obrázek 5 - Molekulární struktura polymerů [4]

### 1.2.1 Lineární

Makromolekuly lineární vznikají spojením monomerů se dvěma funkčními skupinami. Tento tvar makromolekul má například většina termoplastů. Polymery s touto strukturou mají zpravidla vyšší hustotu materiálu, pevnost, modul pružnosti, teplotní odolnost a nižší tažnost. [4]

### 1.2.2 Rozvětvené

Rozvětvené makromolekuly tvoří lineární řetězec s bočními substituenty. Tyto boční výstupky mají za následek oddálení řetězců a tedy zhoršení pohyblivosti a pokles vzájemných sil mezi makromolekulami. Ve výsledku mají rozvětvené makromolekuly nižší pevnost, modul pružnosti, teplotní odolnost, hustotu materiálu, vyšší tažnost a viskozitu. [4]

### 1.2.3 Sesíťované

Sesíťované makromolekuly jsou lineární řetězce spojené příčnými chemickými vazbami. Tímto zesíťením dochází k omezení pohyblivosti makromolekul a tím ztrácí polymer rozpustnost, tavitelnost a dochází ke zhoršení houževnatosti. Zároveň se ale zvyšuje tvrdost, modul pružnosti a teplotní odolnost. Konečné vlastnosti polymeru závisí na hustotě zesíťování, resp. na četnosti příčných chemických vazeb. Tato struktura může vzniknout již při polyreakci a nebo dodatečně při procesu vulkanizace, jako například při vulkanizaci kaučuku. [4]

## 1.3 Velikost makromolekul

Velikost molekul vyjadřuje v chemii molární hmotnost a rozděluje molekuly dle velikosti na dvě skupiny: nízkomolekulární a makromolekulární. Hranice mezi těmito skupinami je 10 000 g/mol, ale jedná se o hranici uměle určenou, jelikož z vlastností látek je vidět, že žádná jasná hranice neexistuje. Dále lze vyjádřit velikost makromolekul polymeračním stupněm, který udává počet strukturních jednotek tvořících makromolekulu. Obecně platí, že čím vyšší je molární hmotnost, neboli velikost molekul, tím vyšší je teplota tání, pevnost, modul pružnosti a nižší tekutost a tažnost. [4]

## 1.4 Přísady

Pro zlepšení vlastností výsledného produktu a lepšímu zpracování se do polymerů přidávají přísady. Hlavními cíli při výrobě jsou stabilita taveniny před vstřikováním, zvýšení tokových vlastností pro lepší zatékavost, nelepivost a snadné vyjmutí z formy. Pro úpravu vlastností produktů se mohou přidávat plastifikátory pro změkčení, retardéry hoření, barviva a plniva. [3]

### 1.4.1 Plniva

Plniva jsou přidávána do polymerů za účelem zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností nebo pro dosažení určitého vzhledu produktu. Přidávaná plniva lze rozdělit na nevyztužující (částicová) a vyztužující. [4]

- a) Nevyztužující pojiva zvyšují viskozitu, tvrdost, tuhost a zmenšují smrštění při vstřikování. Některé prvky pak zvyšují tepelnou vodivost (uhlík, grafit, kovový prach), vnitřně izolační odpor nebo zlepšují kluzné vlastnosti výstřiků (talek). Jedná se o částice o velikostech od desetin až po jednotky a desítky mikronů. Jejich koncentrace v kompozitech může být již od desetin hmotnostního procenta až do desítek procent přesahujících polovinu hmotnosti.

Částicová pojiva můžeme rozdělit podle jejich tvaru na:

- 1) Kulovitá – díky tvaru koule nevznikají velké koncentrace napětí a oproti ostatním tvarům mají nižší odpor proti toku
- 2) Jehličková
- 3) Destičková

Například skleněné kuličky zajišťují nízkou alkalitu, odolnost vůči tlaku a nehořlavost. Dalším významným částicovým pojivem jsou uhlíkové částice, které zajišťují tepelnou vodivost zároveň s vysokou pevností, nízkou teplotní roztažností a lepší chemickou odolností. Za nevyztužující částicová pojiva lze považovat i dřevitou moučku, díky které výsledný kompozit imituje dřevo, ale zároveň si zachovává odolnost vůči nasákavosti, kroucení, plísním apod.

- b) Vyztužující plniva mají tvar vláken, která zvyšují pevnost, tuhost, tvarovou stálost a snižují ohebnost, tažnost a smrštění. Koncentrace kompozitu se pohybuje od pěti do šedesáti hmotnostních procent. U vstřikovacích polymerů se délka vláken pohybuje od desetin do celých milimetrů, průměry vláken jsou pak v řádech mikrometrů. Vzhledem k délce vlákna se projevuje anizotropie, kdy mechanické vlastnosti kompozitu záleží také na natočení vláken. [3]

## 2 Reologie

Reologie je věda, která popisuje vztah mezi rychlostí deformace a napětím v látkách. Taveniny polymerů jsou viskoelastické látky a jejich tokové vlastnosti jsou teplotně závislé. Viskoelastické materiály kombinují vlastnosti viskózních a elastických látek. Elastické materiály se za působení síly deformují, ale po odebrání síly se vrací zpět do svého původního tvaru, jelikož u nich nedochází k disipaci vložené mechanické energie v teplo. U viskózních materiálů všechna vložená mechanická energie disipuje v teplo, a proto nedochází ke zpětnému využití. V případě viskoelastických materiálů dochází k částečné přeměně mechanické energie v teplo – proto má poměrná deformace fázové zpoždění vůči působícímu napětí. [1]

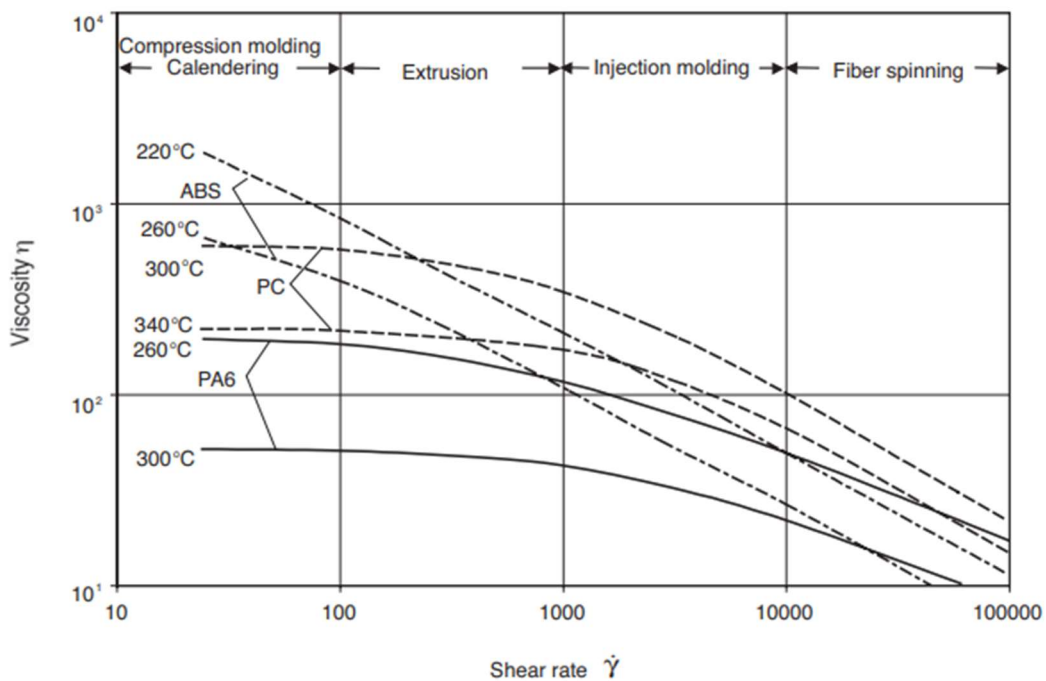
Viskozita kapalin se projevuje jako odpor částic kapaliny vůči pohybu. Míra viskozity a její změny závisí na druhu kapaliny. [2]

### 2.1 Tokové vlastnosti

V důsledku molekulární struktury polymerních makromolekul lze pozorovat tři základní jevy, které odlišují polymerní od jednoduchých tekutin.

#### 2.1.1 Nenevtonská viskozita

V newtonských kapalinách, kde je smykové napětí přímo úměrné smykové rychlosti, je změna viskozity závislá pouze na teplotě. V případě nenevtonských kapalin je ale viskozita závislá také na rychlosti deformace, jelikož při vyšších napětích jsou molekuly roztažené a uvolněné. Tento jev jim umožňuje posun a smýkání se kolem sebe, což má za výsledek snížení viskozity taveniny. [1]



Obrázek 6 - Závislost viskozity termoplastů na velikosti smykové rychlosti [1]

### 2.1.2 Normálové napětí ve smykovém toku

Tendence molekul v polymerech kroutit se při natahování ve smykovém toku má za důsledek vznik normálových sil v tekutině. [1]

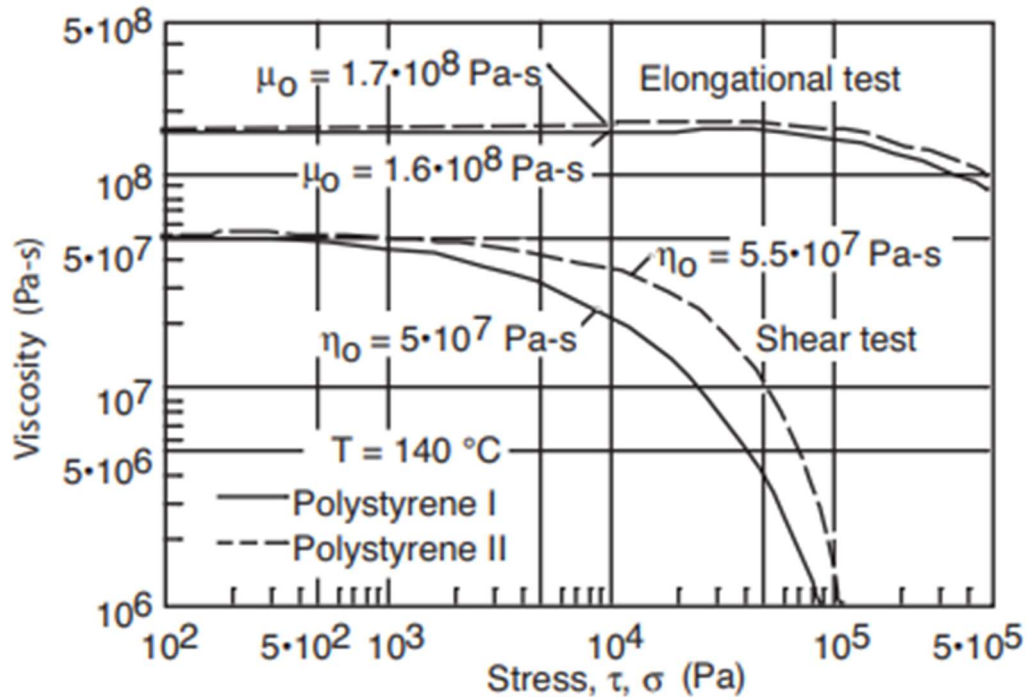
### 2.1.3 Elastické efekty

Při deformaci polymerní taveniny roztažením nebo smykem jsou molekuly polymeru roztahovány a uvolňovány. V případě krátké doby deformace se mohou molekuly vrátit do své původní pozice a obnoví tak i původní tvar taveniny. Pokud deformace trvá déle, napětí se uvolní, molekuly se přizpůsobí a polymer se nevrátí do původního tvaru.[1]



### 2.1.4 Elongační viskozita

Elongační deformace je hlavním typem deformace v procesech práce s polymery, jako například tvarování za tepla, vstřikování nebo pění. Z porovnání smykové a elongační viskozity na obrázku 7 vyplývá, že elongační viskozita je třikrát až čtyřikrát větší než smyková. [1]



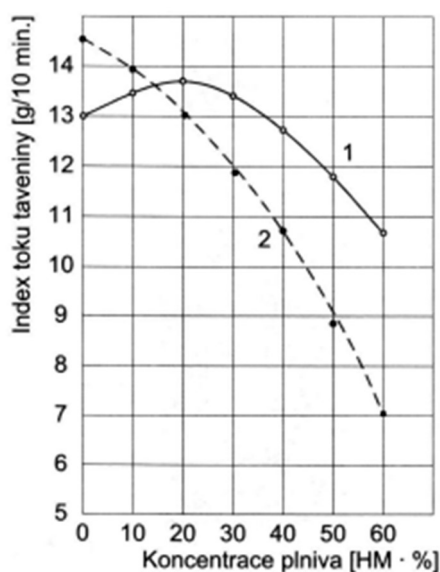
Obrázek 7 – Křivky smykové a elongační viskozity pro dva druhy polystyrenu [1]

### 2.1.5 Index toku taveniny

Index toku taveniny (MFI, z anglického Melt Flow Index) je standardizovaná veličina udávající množství taveniny, které je vytlačeno tryskou definované délky a průměru při určitém zatížení a teplotě za 10 minut. Index toku taveniny dělíme na:

- Hmotnostní index toku taveniny (MFR, z angl. Melt mass-Flow Rate) – měří se hmotnost vytlačené kapaliny za čas a jednotkou je g/10min. MFR se udává především u neplněných materiálů, u kterých platí přímá úměra mezi MFR a tekutostí.
- Objemový index toku taveniny (MVR, z angl. Melt Volume-flow Rate) – měří se vytlačený objem taveniny za čas a jednotkou je cm<sup>3</sup>/10min. Tento index

je vhodný pro plněné (kompozitní) materiály, protože obsah plniva zkresluje závislost MFR na teplotě, což demonstruje křivka 1 na obrázku 8. [3,4,11]



**Obrázek 8 - Závislost hmotnostního (1) a objemového indexu toku taveniny PP plněného mikromletým vápencem na jeho obsahu – MFI [g/10min] 49,03/230 [3]**

Jelikož je index toku taveniny udáván za určitého tlaku a teploty, je tato hodnota podstatná při kontrole kvality a slouží jako orientační údaj pro přehled v materiálech. Pro získání informací o chování taveniny při výrobním procesu a širokém rozsahu podmínek se využívá kapilární reometr. [11]

### 2.1.6 Modely toku čistě viskózních neneutonských látek

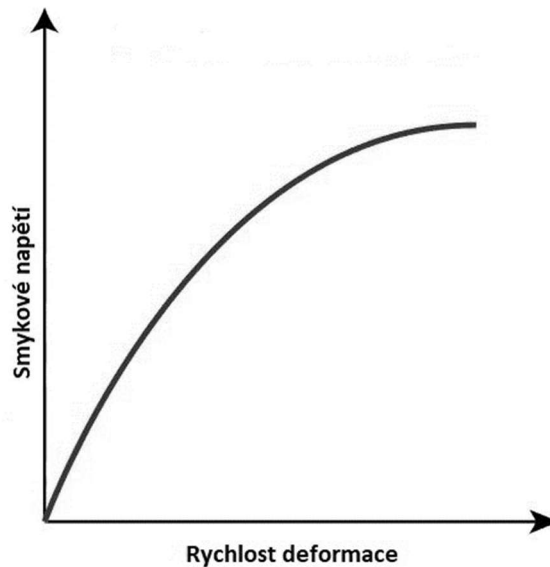
Reologické modely toku se snaží co nejvíce přiblížit tokové křivce v celé šíři rychlostí smykové deformace, a proto jich existuje více.

#### 2.1.6.1 Mocninový model

Mocninový model, který vytvořil Ostwald a de Waale, je jednoduchý model přesně popisující oblast smykového napětí ve viskozitě v závislosti na smykové rychlosti. Tento model zanedbává vlastnosti neneutonských kapalin při malých rychlostech deformace, jelikož jeho předností je hlavně jednoduchost a využití pouze dvou měřených parametrů. Matematický zápis mocninového modelu vypadá takto:

$$\eta = K(T)\dot{\gamma}^{n-1} \quad (1)$$

kde  $\dot{\gamma}$  je smyková rychlost [ $s^{-1}$ ],  $K$  [ $Pa \cdot s^n$ ] je koeficient konzistence, který může obsahovat teplotní závislost viskozity a  $m$  [-] je index toku, který představuje pseudoplastické chování taveniny polymeru. [1]



Obrázek 9 - Mocninový model [16]

#### 2.1.6.2 Carreau model

Carreau model je velice často využívaný ve vyhodnocovacích softwarech. Jedná se o model, který vyhovuje celé škále rychlostí smykové deformace:

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

kde  $\eta_0$  je viskozita při nulové smykové rychlosti,  $\eta_\infty$  je viskozita při nekonečné smykové rychlosti,  $\dot{\gamma}$  je smyková rychlost,  $\lambda$  je časová konstanta a  $n$  je index toku z mocninového modelu. Ve většině případů je viskozita při nekonečné smykové rychlosti zanedbatelná. [1,12]

## 2.2 Základní vztahy pro tok mocninové kapaliny obdélníkovou kapilárou

### Hmotnostní průtok

$$\dot{m} = \frac{m_v}{t} [kg/s] \quad (3)$$

### Objemový průtok

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} [m^3/s] \quad (4)$$

### Tlaková ztráta v obdélníkové štěrbině

$$\Delta p = L \cdot \frac{4 \cdot \tau}{D_H} [Pa] \quad (5)$$

### Hydraulický průměr

$$D_H = \frac{2 \cdot W \cdot H}{W + H} [m] \quad (6)$$

### Střední rychlost toku

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{H \cdot W} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (7)$$

### Smykové napětí

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

Koeficienty a, b jsou korekční součinitele pro obdélníkový otvor:

H/W	a	b
0,00	0,5000	1,0000
0,25	0,3212	0,8182
0,50	0,2440	0,7276
0,75	0,2178	0,6866
1,00	0,2121	0,6766

Tabulka 1 - Korekční součinitele [13]

### Smyková rychlost

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \dot{V}}{W \cdot H^2} \left( 2 + \frac{1}{n} \right) [s^{-1}] \quad (9)$$

### Viskozita

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}^n} [Pa \cdot s] \quad (10)$$

## 2.3 Korekce toku

### 2.3.1 Bagley

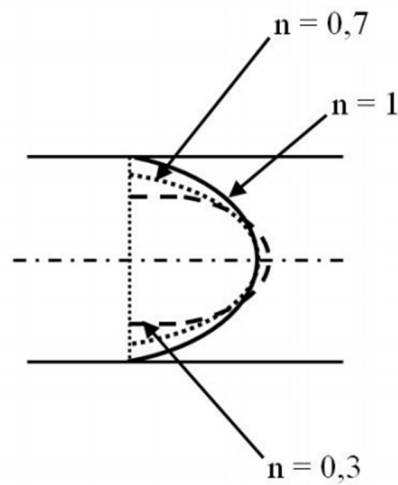
Hodnoty naměřené reometrem odpovídají předpokladu, že při přechodu kapaliny ze zásobníku do kapiláry nedochází k žádné tlakové ztrátě. Jelikož ale k tlakovým ztrátám dochází, je nutno použít korekci toku. Bagleyho korekce využívá pro výpočet skutečného napětí efektivní délku kapiláry  $eR$ :

$$\tau_{sk} = \frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot (L + eR)} [Pa] \quad (11)$$

### 2.3.2 Rabinowitsch

Rabinowitschova korekce zahrnuje do výpočtu smykové rychlosti tvar tokového profilu kapilárou, který se pro pseudoplastické látky liší od ideálního, newtonského průtoku. Skutečná smyková deformace pseudoplastických látek je menší než zdánlivá. [6]

$$\dot{\gamma}_{sk} = \frac{4}{\pi \cdot R^3} \cdot \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} = \dot{\gamma}_{zd} \cdot \left( \frac{3}{4} \cdot \frac{d \cdot \log \dot{\gamma}}{4 \cdot d \cdot \log \tau} \right) [s^{-1}] \quad (12)$$



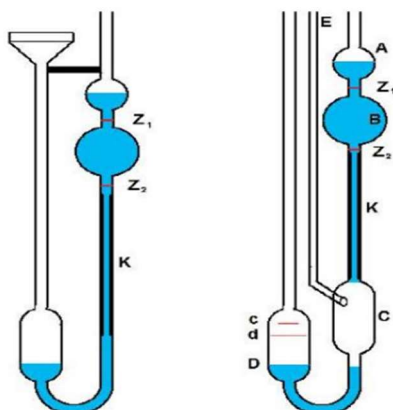
Obrázek 10 - Rychlostní profily polymerních tavenin [6]

### 3 Reometrie

Reometrie experimentálně stanovuje závislosti zdánlivé viskozity na tečném napětí nebo gradientu rychlosti. K měření viskozity lze použít viskozimetr, který ale měří pouze jednu hodnotu za konstantních podmínek. Běžně využívané viskozimetry jsou průtokové a pádové. Pro měření v určitém rozsahu smkových rychlostí se využívá reometr, pomocí kterého lze zjistit tokovou křivku i za měnících se podmínek (nenewtoské kapaliny). Toková křivka vyjadřuje závislost smykového napětí na rychlosti deformace a je možné z ní určit závislost viskozity na rychlosti deformace. Reometry jsou nejčastěji rotační, oscilační a kapilární. Taveniny polymerů i pro vysoké rychlosti deformace vykazují vzhledem ke svým tokovým vlastnostem laminární režim toku. [8]

#### 3.1 Průtokový viskozimetr

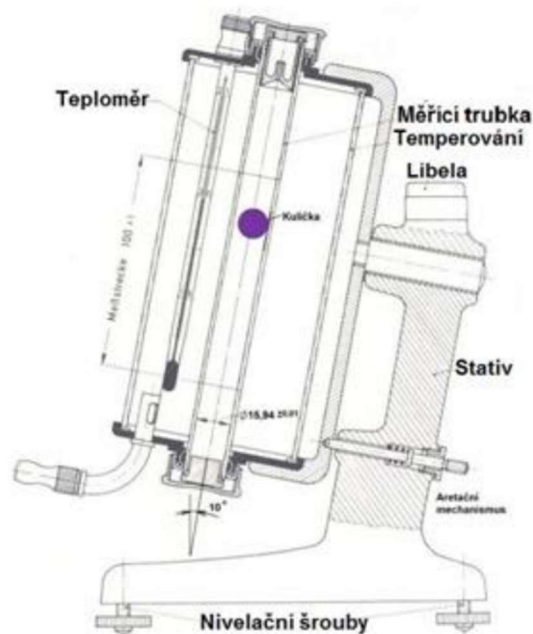
Průtokové viskozimetry jsou nejjednodušším způsobem měření viskozity. Využívají Poisseuovu rovnici pro laminární výtok kapaliny z kolmé trubice kruhového průřezu. Průtok kapilárou je závislý na tlaku a jeho rychlostní gradient, stejně jako rychlost deformace a smyková rychlost, bude maximální u stěny a nulový ve středu toku. Jelikož se jedná o nehomogenní tok, může tento viskozimetr měřit pouze stabilní smykové funkce jako je viskozita. Vzhledem k nízkým nákladům, nenáročnosti použití a v případě dlouhé kapiláry i veliké přesnosti, se jedná o často používaný typ viskozimetru. [2,8]



Obrázek 11 - Průtokové viskozimetry [2]

### 3.2 Pádový viskozimetr

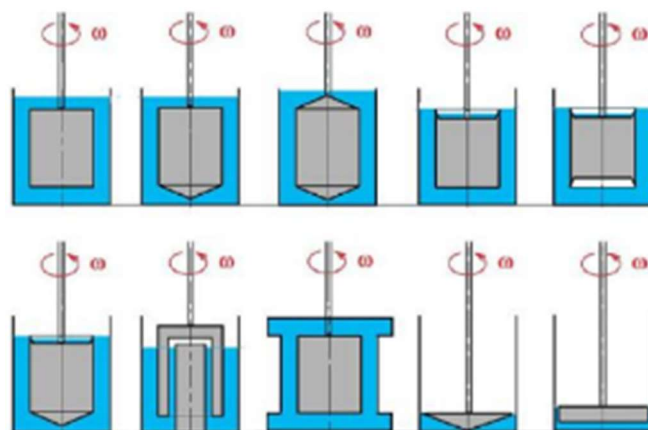
Pádové viskozimetry určují viskozitu kapaliny měřením rychlosti pádu známého tělíska trubicí s kapalinou. Za pomoci Stokesovy rovnice je pak pomocí měřených a známých údajů vypočítána viskozita. [2]



Obrázek 12 - Höpplerův pádový viskozimetr [2]

### 3.3 Rotační reometr

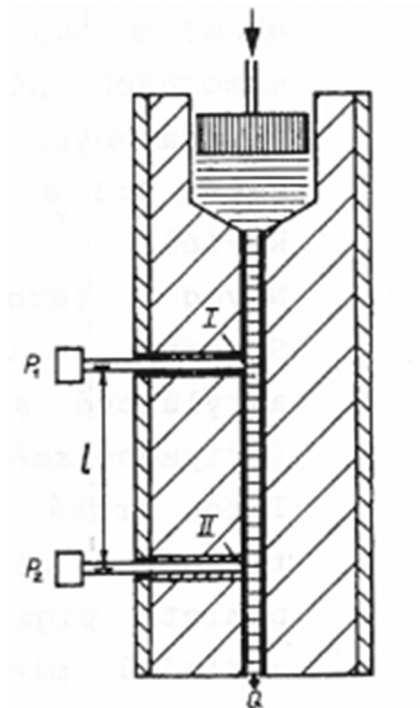
Rotační reometr měří viskozitu a elasticitu neneutonských kapalin v široké škále podmínek, na rozdíl od viskozimetru, který je schopen měřit pouze viskozitu za konstantních podmínek. Za různých otáček měří reometr brzdny účinek na rotující část přístroje, neboli točivý moment přenášený vzorkem na statickou část. Ze zadané rychlosti rotace a točivého momentu a naměřeného brzdny účinku se následně vypočítávají výsledné vlastnosti vzorku a vytváří se toková křivka. [7]



Obrázek 13 – Typy uspořádání rotačního reometru [2]

### 3.4 Kapilární reometr

Průtokové měření viskozity vychází z Poisseuilovy rovnice pro laminární výtok kapaliny z trubice kolmému průřezu vlastní hmotností. Pro zajištění laminárního proudění i u kapalin s nízkou viskozitou se využívá kapilární trubice. Toto platí pro kapilární reometr stejně jako pro kapilární viskozimetr. Reometr má dále nastavitelný tlakový spád, který umožňuje pozorovat závislost objemového průtoku a tlakové ztráty, a tedy závislost smykové rychlosti na smykovém napětí. Tento tlakový spád je zajištěn buď výškou sloupce kapaliny, tlakem interního plynu nebo zatěžovaným pístem. Měřením získáme tyto hodnoty: tlakovou ztrátu, objemový průtok a rozměry kapiláry, které umožňují určit tokovou křivku nenewtonských kapalin. [6,8,9]

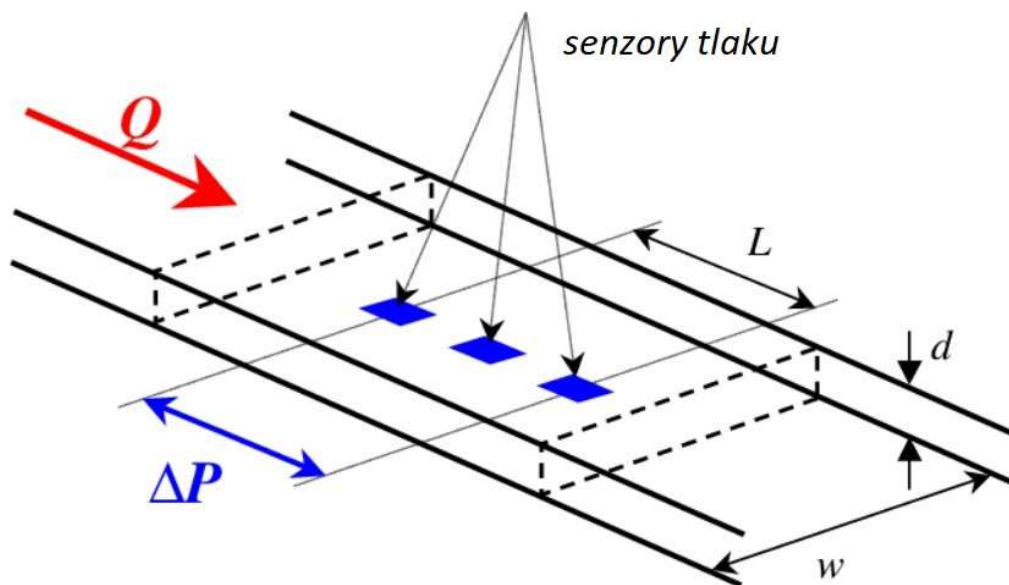


Obrázek 14 - Kapilární reometr [8]



## 4 Reometrická hlava

K měření tokových vlastností polymerů a jejich tokové křivky lze také využít reometrickou hlavu, která se připojí na ústí extruderu. Tato hlava funguje na principu kapilárního reometru a měří tedy tlakovou ztrátu na určitém úseku kapiláry (rozdíl mezi vstupním a výstupním tlakem). Některé hlavy mají i více tlakových a teplotních senzorů a měří tak na více úsecích.



Obrázek 15 - Princip kapilárního reometru  
 $Q$  – průtok,  $\Delta P$  – změna tlaku,  $L$  – délka měřeného úseku,  $d$  – výška kapiláry,  $w$  – šířka kapiláry [10]

## 5 Experimentální měření

Závislost smykové viskozity na smykové rychlosti je stěžejním údajem pro plánování jakéhokoliv výrobního procesu, který se týká tavenin polymerů. Způsobů, jak naměřit reogram, je více. Běžně se pro měření využívají rotační a kapilární reometry, které ale mají svá omezení. Data z rotačního reometru jsou spolehlivá pouze při nízkých smykových rychlostech (do 10 s<sup>-1</sup>). U kapilárního reometru prochází polymer pouze ohřevem a nedochází k žádnému míchání a homogenizaci. Výsledky se tak mohou lišit od chování při samotném vstřikování. [14]

Výhodou měření pomocí reometrické hlavy připojené k extruderu je právě simulace reálného procesu výroby a výsledek tedy reprezentuje plnohodnotný obraz chování daného polymeru při jeho průmyslovém zpracování. [14]

### 5.1 Stroj a další nástroje

#### 5.1.1 Extruder

Měření jsme prováděli na extruderu EB - L30 od firmy BOCO PARDUBICE machines s následujícími parametry:

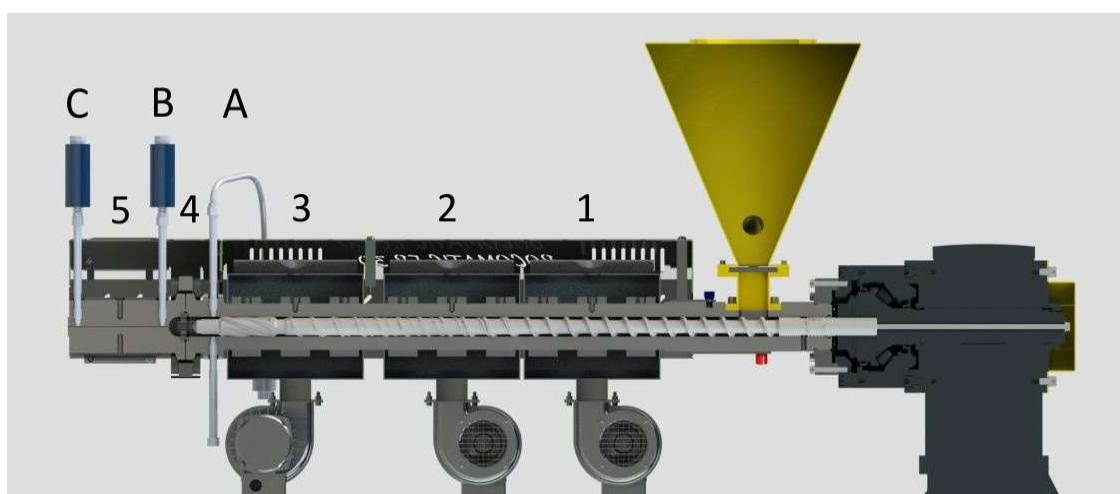
Průměr šneku [mm]	30
Délka šneku [L/D]	30
Výkon extruderu [kg/h]	2-10
Celkový příkon [kW]	9

*Tabulka 2 - Parametry extruderu EB - L30 od firmy BOCO [15]*



**Obrázek 16 - Extruder EB - L30**

Extruder s reometrickou hlavou má celkem 5 teplotních zón, které mají svůj vlastní ohřev a teplotní čidlo. Ideálně by požadované teploty v jednotlivých zónách pro každý materiál měly být uvedeny v materiálových listech. Hřídel se šnekem je uložena v ložiskách pouze na straně u převodovky a v oblasti šneku je středěná samotnou taveninou – proto by extruder nikdy neměl běžet naprázdno, bez přísunu materiálu.



**Obrázek 17 - Řez extruderem a reometrickou hlavou**

### 5.1.2 Reometrická hlava

Na výstup z extruderu jsme připevnili reometrickou hlavu s kapilárou o průřezu obdélníku o délce 20 mm a výšce 1 mm. Hlava je osazena teplotními čidly a tlakovými snímači Dyniser MDT460F-1/2-1M-15-SIL2, které jsou vidět na obrázku 17 pod označením A, B a C.

### 5.1.3 Váha

Vzorky jsme vážili na váze AND HF-2000G o rozsahu 0,5 – 2100 g a přesnosti na setinu gramu.



**Obrázek 18 - Váha AND HF-2000G**

### 5.1.4 Stopky

K měření času jsme využívali stopky na mobilním telefonu.

## 5.2 Metodika

Základním principem této experimentální části bylo naměřit hmotnostní průtok a tlakovou ztrátu pro různé otáčky šneku a z těchto údajů sestavit reogram pro daný materiál.

### 5.2.1 Postup měření

#### 5.2.1.1 Příprava

Po zapnutí extruderu bylo nejdříve potřeba dosáhnout žádoucí teploty ve všech teplotních zónách, aby došlo k roztavení polymeru zatuhlého v oblasti šneku a kapiláry z předešlého měření. Pokud by došlo ke spuštění otáčení šneku před

roztavením, vedlo by to k překročení pevnosti pojistky na spojce nebo dokonce trvalému poškození hřídele šneku nebo motoru.

Po dosažení teploty tavení předešlého polymeru a naplnění násypky měřeným polymerem bylo tedy možné zapnout otáčení šneku. Pro přesné měření je podstatné, aby vytlačovaný vzorek neobsahoval polymer z předešlého měření – tedy aby byl čistý. Proto jsme nezačínali ihned měřit, ale nechali jsme extruder vytlačovat taveninu a opticky kontrolovali její čistotu. Zda je tavenina polymeru již bez příměsi jiného granulátu, je možné poměrně přesně pozorovat na vytlačovaném vzorku. Rozdíl mezi jednotlivými materiály bylo možné pozorovat jak přímo při vytlačování, tak také po vychladnutí polymeru.



**Obrázek 19 - Mosten (čirý) se zbytky Scolefinu (bílý pruh)**



**Obrázek 20 - Čistý Mosten**



**Obrázek 21 - Srovnání odlitku z Litenu (vlevo) a Mostenu (vpravo)**

Při čekání na vyčištění jsme ozkoušeli přibližné maximální otáčky šneku pro měřený materiál tak, abychom nepřekročili únosnost stroje 300 bar. Na základě tohoto zjištění jsme poté zvolili rozsah měření a krok, jakým budeme otáčky navyšovat nebo snižovat.

#### 5.2.1.2 Měření

Měření probíhalo v krocích pro otáčky dané únosností stroje a každé měření jsme opakovali dvakrát pro eliminaci výrazných chyb. Hodnoty nutné pro výpočet hmotnostního toku a tlakové ztráty, které jsme potřebovali získat jsou: čas, hmotnost vytlačeného vzorku, tlak za vstupem do kapiláry a tlak před výstupem z kapiláry.

Před každým dílčím měřením jsme nastavili otáčky a počkali na ustálení tlaků. Následně jsme zapnuli měření času a začali jímat vytlačenou taveninu do nádoby. Po vytlačení opticky dostatečného množství jsme zastavili čas a přestali zachytávat taveninu. Hmotnost vzorku jsme navážili. Tlakovou ztrátu na čidlech B a C zaznamenával samotný stroj na USB disk. Tento proces jsme opakovali pro každý zvolený krok otáček.

#### 5.2.1.3 Ukončení měření

Některé polymery nesmějí po konci měření zůstat v extruderu a zatuhnout, protože i přes nahřátí před dalším měřením ničí při spuštění šneku povrch komory. To se v našem případě týkalo pouze Scoléfinu, který jsme tak museli vytlačit Litenem. Liten a Mosten takovou vlastnost nemají, a tak je možné je nechat ve stroji bez čištění.

### 5.3 Naměřené hodnoty a vyhodnocení

#### 5.3.1 Liten MB-61

Liten MB-61 patří do skupiny HDPE (vysokohustotní polyethyleny). Jedná se o homopolymer vhodný pro vstřikování. Využívá se k výrobě přepravek, nádob a dalších výrobků, které vyžadují dobrou tuhost a rázovou houževnatost. [17]

### 5.3.1.1 Naměřené hodnoty

otáčky šneku	hmotnost nádoby	celková hmotnost	čas měření	tlaková ztráta
$[\text{min}^{-1}]$	$m_0 [g]$	$m_c [g]$	$t [s]$	$\Delta p [\text{bar}]$
43	76.58	147.18	123	236.6226591
	198.3	278.1	139	232.6635435
40	199.7	280.9	154	224.0274608
	198.3	280.2	153	225.2000192
35	198.5	268.1	149	208.0924118
	198.3	269.9	154	204.4644423
30	198.3	272.2	183	185.0640081
	198.3	278.4	201	186.5693406
25	198.2	270.4	216	162.7607740
	198.3	269.5	213	163.7901959
20	198.2	267.2	258	141.1283409
	198.3	276.8	297	141.3229010
15	198.4	259.2	306	114.3651845
	198.3	258.9	303	114.3006238
10	198.3	247.6	363	84.0357444
	198.3	247.4	363	84.1443008

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty pro LITEN MB-61

Tlaková ztráta reprezentuje rozdíl tlaků naměřených na tlakových snímačích B a C s odečtenými počátečními tlaky před zapnutím stroje – tedy při prázdné kapiláře.

$$\text{hustota } \rho = 745 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{šířka kapiláry } W = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{výška kapiláry } H = 0,001 \text{ m}$$

$$\text{délka kapiláry } L = 0,155 \text{ m}$$

### 5.3.1.2 Výpočet pro jeden bod reogramu

hmotnost vyextrudované taveniny

$$m_v = m_c - m_0 = 147,18 - 76,58 = 70,6 \text{ g} = 0,071 \text{ kg} \quad (13)$$

hmotnostní průtok

$$\dot{m} = \frac{m_v}{t} = \frac{0,071}{123} = 5,74 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (3)$$

objemový průtok

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{5,74 \cdot 10^{-4}}{745} = 7,70 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

smyková rychlost

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \dot{V}}{W \cdot H^2} = \frac{2 \cdot 7,70 \cdot 10^{-7}}{0,02 \cdot 0,001^2} = 77,04 \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

hydraulický průměr

$$D_H = \frac{2 \cdot W \cdot H}{W + H} = \frac{2 \cdot 0,02 \cdot 0,001}{0,02 + 0,001} = 1,90 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6)$$

smykové napětí

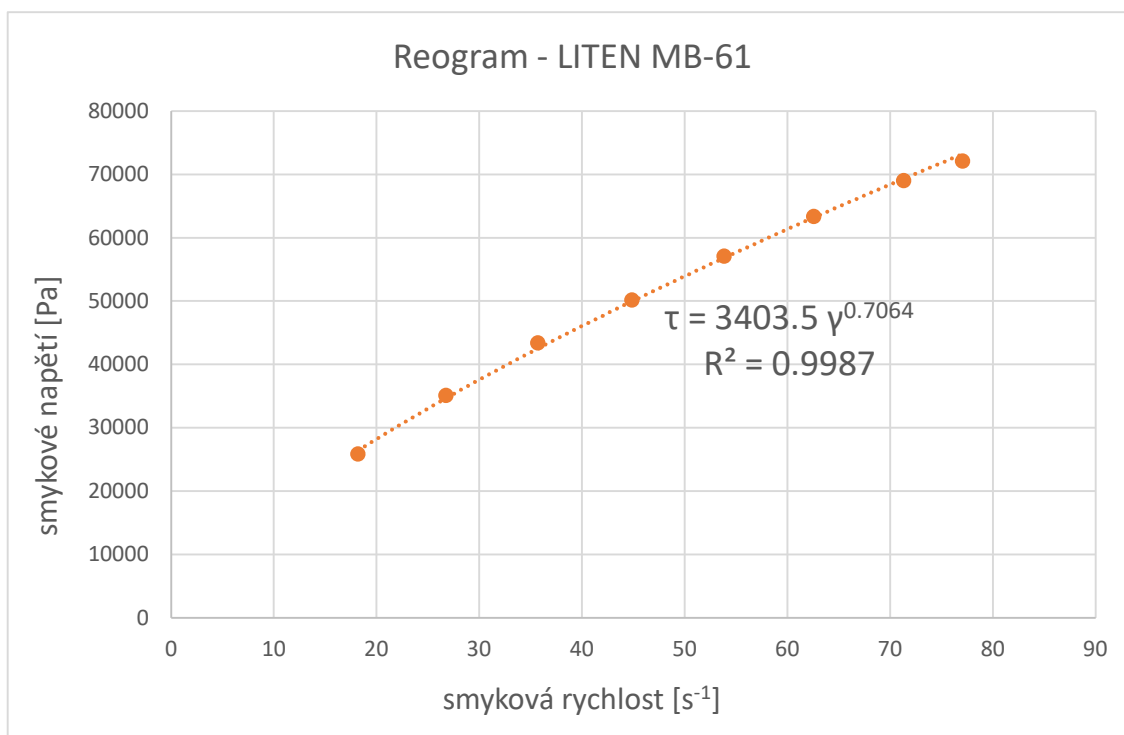
$$\tau = \frac{D_H \cdot \Delta p \cdot 10^5}{4 \cdot L} = \frac{1,90 \cdot 10^{-3} \cdot 236,62 \cdot 10^5}{4 \cdot 0,155} = 72695,13 \text{ Pa} \quad (8)$$

otáčky šneku	smyková rychlost	smykové napětí	průměr smyk. rychlostí	průměr smyk. napětí
$[\text{min}^{-1}]$	$\dot{\gamma} [\text{s}^{-1}]$	$\tau [\text{Pa}]$	$\bar{\gamma} [\text{s}^{-1}]$	$\bar{\tau} [\text{Pa}]$
43	77.04	72695.13	77.05	72086.97
	77.06	71478.82		
40	70.77	68825.64	71.31	69005.76
	71.85	69185.87		
35	62.70	63930.08	62.55	63372.79
	62.41	62815.50		
30	54.20	56855.30	53.85	57086.54
	53.49	57317.77		
25	44.87	50003.31	44.87	50161.44
	44.87	50319.57		
20	35.90	43357.40	35.69	43387.29
	35.48	43417.17		
15	26.67	35135.23	26.76	35125.32
	26.85	35115.40		
10	18.23	25817.43	18.19	25834.11
	18.16	25850.78		

Tabulka 4 - Vypočtené hodnoty pro LITEN MB-61



Z těchto hodnot jsem vytvořil reogram pro závislost smykového napětí na smykové rychlosti. Body reogramu jsem proložil mocninovým modelem toku čistě viskózních neneutonských látek.



Obrázek 22 - Reogram LITEN MB-61

Rovnice mocninového modelu má pro naše využití obecný tvar

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

kde  $n$  je index toku a  $K$  je koeficient konzistence. Z předpisu funkce křivky naměřeného reogramu  $\tau = 3403,5 \cdot \dot{\gamma}^{0,7064}$  jsem určil, že je index toku  $n = 0,7064$  a koeficient konzistence  $K = 3403,5$ . Zjištěný index toku jsem použil k určení druhé iterace smykové rychlosti.

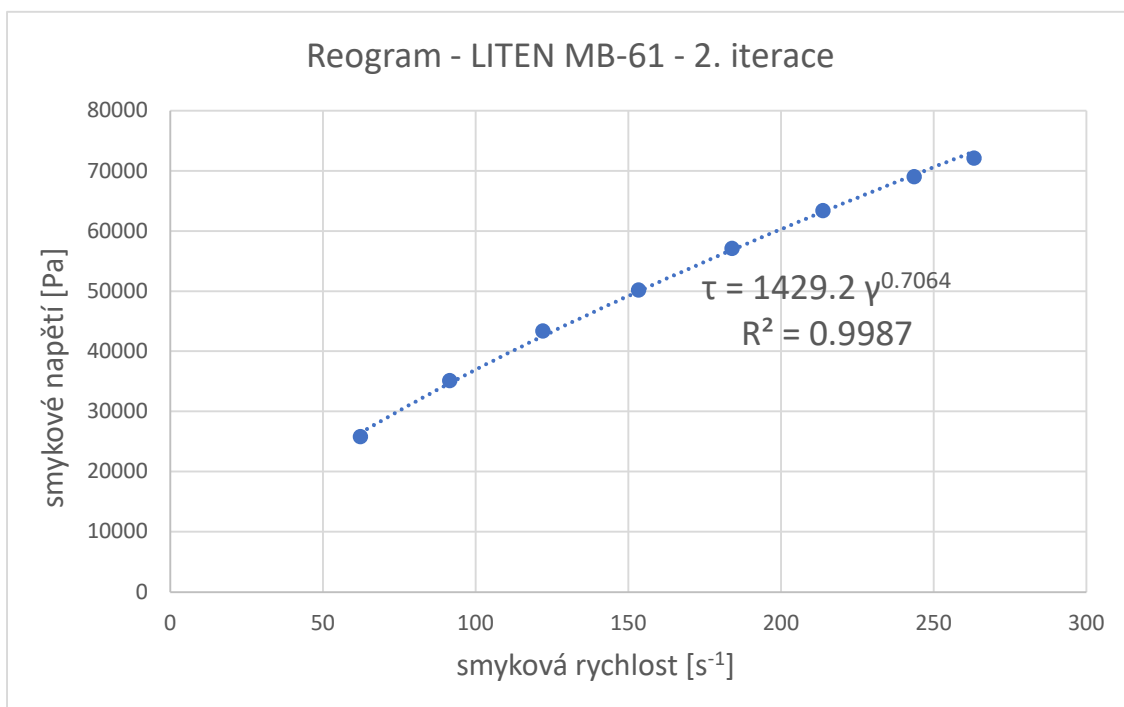
2. iterace smykové rychlosti

$$\dot{\gamma}' = \frac{2 \cdot \dot{V}}{W \cdot H^2} \left(2 + \frac{1}{n}\right) = \frac{2 \cdot 7,70 \cdot 10^{-7}}{0,02 \cdot 0,001^2} \left(2 + \frac{1}{0,7064}\right) = 263,16 \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

otáčky šneku	průměr smyk. napětí	smyková rychlost 2. iterace	průměr smyk. rychlosti
[min <sup>-1</sup> ]	$\bar{\tau}$ [Pa]	$\dot{\gamma}'$ [s <sup>-1</sup> ]	$\bar{\dot{\gamma}}'$ [s <sup>-1</sup> ]
43	72086.97	263.16	263.18
		263.21	
40	69005.76	241.74	243.58
		245.42	
35	63372.79	214.16	213.66
		213.16	
30	57086.54	185.14	183.92
		182.71	
25	50161.44	153.25	153.25
		153.26	
20	43387.29	122.62	121.90
		121.18	
15	35125.32	91.10	91.40
		91.69	
10	25834.11	62.27	62.14
		62.01	

Tabulka 5 - Vypočtené hodnoty pro LITEN MB-61, 2. iterace

Z hodnot smykového napětí a 2. iterace smykových rychlostí jsem vytvořil finální závislost smykového napětí na smykové rychlosti.



Obrázek 23 - Reogram LITEN MB-61, 2. iterace

### 5.3.2 Mosten GB-107

Mosten GB-107 je polypropylen, homopolymer, určený pro vstřikování. Využívá se pro výrobu skladovacích boxů, domácích potřeb, hmoždinek, hraček a dalších technických dílů. Mosten je velice odolný proti většině chemikálií a vysoce stabilní. [18,19]

#### 5.3.2.1 Naměřené hodnoty

otáčky šneku	hmotnost nádoby	celková hmotnost	čas měření	tlaková ztráta
$[min^{-1}]$	$m_o [g]$	$m_c [g]$	$t [s]$	$\Delta p [bar]$
10	198.3	254.1	361	93.64
	198.3	247.1	360	88.62
15	198.3	265.0	301	114.18
	198.3	260.2	300	104.37
20	198.3	265.4	240	123.89
	198.3	263.9	240	119.56
25	198.3	272.5	210	134.67
	198.3	270.3	210	129.92
30	198.3	272.7	181	145.67
	198.3	270.9	180	142.38
35	198.3	277.3	165	153.91
	198.3	275.7	165	151.41
40	198.3	279.7	150	162.30
	198.3	278.7	150	157.15
45	198.3	269.4	120	169.92
	198.3	270.3	120	164.80
55	198.3	274.7	105	179.00
	198.3	274.1	105	177.60
65	198.3	270.0	85	189.79
	198.3	271.0	85	188.65
75	198.3	266.5	70	198.99
	198.3	266.4	70	198.32
85	198.3	263.9	60	206.55
	198.3	264.0	60	207.29
95	198.3	270.6	60	214.12
	198.3	271.6	60	213.74

**Tabulka 6 - Naměřené hodnoty pro MOSTEN GB-107**

Tlaková ztráta reprezentuje rozdíl tlaků naměřených na tlakových snímačích B a C s odečtenými počátečními tlaky před zapnutím stroje – tedy při prázdné kapiláře.

$$\text{hustota } \rho = 752 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{šířka kapiláry } W = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{výška kapiláry } H = 0,001 \text{ m}$$

$$\text{délka kapiláry } L = 0,155 \text{ m}$$

### 5.3.2.2 Výpočet pro jeden bod reogramu

hmotnost vyextrudované taveniny

$$m_v = m_c - m_0 = 254,1 - 198,3 = 55,8 \text{ g} = 0,056 \text{ kg} \quad (13)$$

hmotnostní průtok

$$\dot{m} = \frac{m_v}{t} = \frac{0,056}{361} = 1,55 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s} \quad (3)$$

objemový průtok

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{1,55 \cdot 10^{-4}}{752} = 2,055 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

smyková rychlost

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \dot{V}}{W \cdot H^2} = \frac{2 \cdot 2,055 \cdot 10^{-7}}{0,02 \cdot 0,001^2} = 20,55 \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

hydraulický průměr

$$D_H = \frac{2 \cdot W \cdot H}{W + H} = \frac{2 \cdot 0,02 \cdot 0,001}{0,02 + 0,001} = 1,90 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6)$$

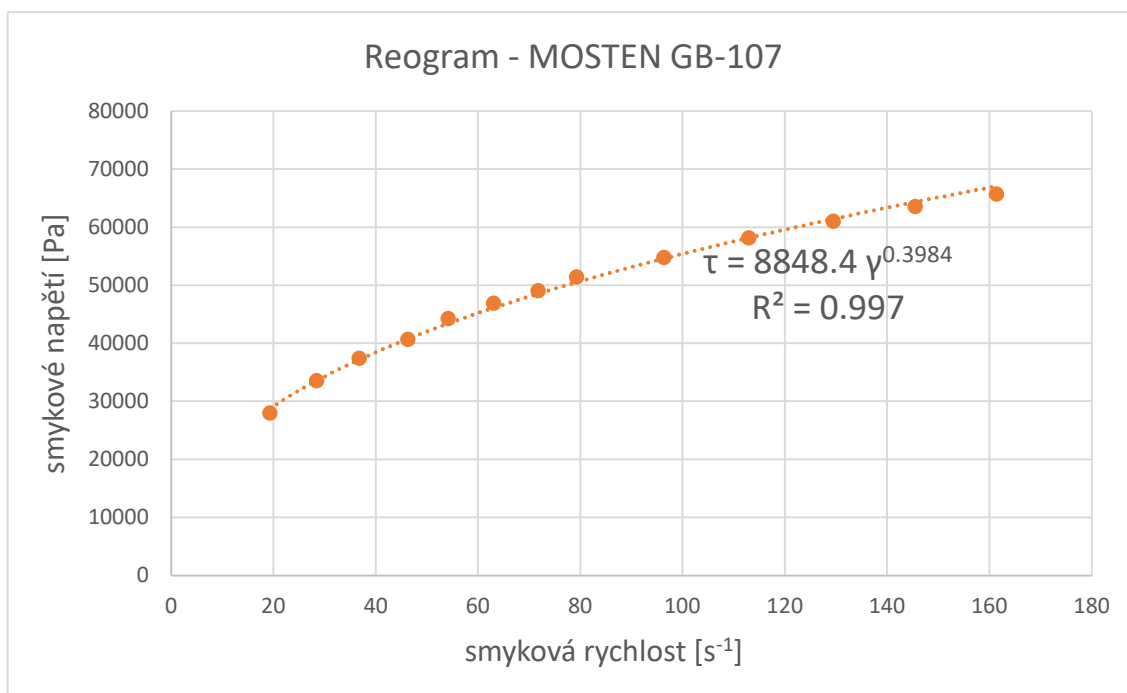
smykové napětí

$$\tau = \frac{D_H \cdot \Delta p \cdot 10^5}{4 \cdot L} = \frac{1,90 \cdot 10^{-3} \cdot 93,64 \cdot 10^5}{4 \cdot 0,155} = 28769,29 \text{ Pa} \quad (8)$$

otáčky šneku	smyková rychlost	smykové napětí	průměr smyk. rychlostí	průměr smyk. Napětí
$[min^{-1}]$	$\dot{\gamma} [s^{-1}]$	$\tau [Pa]$	$\bar{\gamma} [s^{-1}]$	$\bar{\tau} [Pa]$
10	20.55	28769.29	19.29	27996.91
	18.03	27224.53		
15	29.47	35078.96	28.45	33571.85
	27.44	32064.74		
20	37.18	38062.11	36.76	37396.43
	36.35	36730.75		
25	46.99	41373.02	46.29	40643.82
	45.59	39914.62		
30	54.66	44753.33	54.15	44247.12
	53.63	43740.91		
35	63.67	47283.55	63.02	46899.24
	62.38	46514.93		
40	72.16	49863.08	71.72	49070.96
	71.28	48278.84		
45	78.79	52202.28	79.29	51415.52
	79.79	50628.76		
55	96.76	54991.54	96.38	54776.31
	96.00	54561.08		
65	112.17	58306.82	112.95	58132.30
	113.74	57957.78		
75	129.56	61133.00	129.46	61030.04
	129.37	60927.07		
85	145.39	63455.55	145.50	63569.68
	145.61	63683.80		
95	160.24	65782.33	161.35	65723.70
	162.46	65665.07		

**Tabulka 7 - Vypočtené hodnoty pro MOSTEN GB-107**

Z těchto hodnot jsem vytvořil reogram pro závislost smykového napětí na smykové rychlosti. Body reogramu jsem proložil mocninovým modelem toku čistě viskózních neneutonských látek.



Obrázek 24 - Reogram MOSTEN GB-107

Rovnice mocninového modelu má pro naše využití obecný tvar

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

kde  $n$  je index toku a  $K$  je koeficient konzistence. Z předpisu funkce křivky naměřeného reogramu  $\tau = 8848.4 \cdot \dot{\gamma}^{0,3984}$  jsem určil, že je index toku  $n = 0,3984$  a koeficient konzistence  $K = 8848.4$ . Zjištěný index toku jsem použil k určení druhé iterace smykové rychlosti.

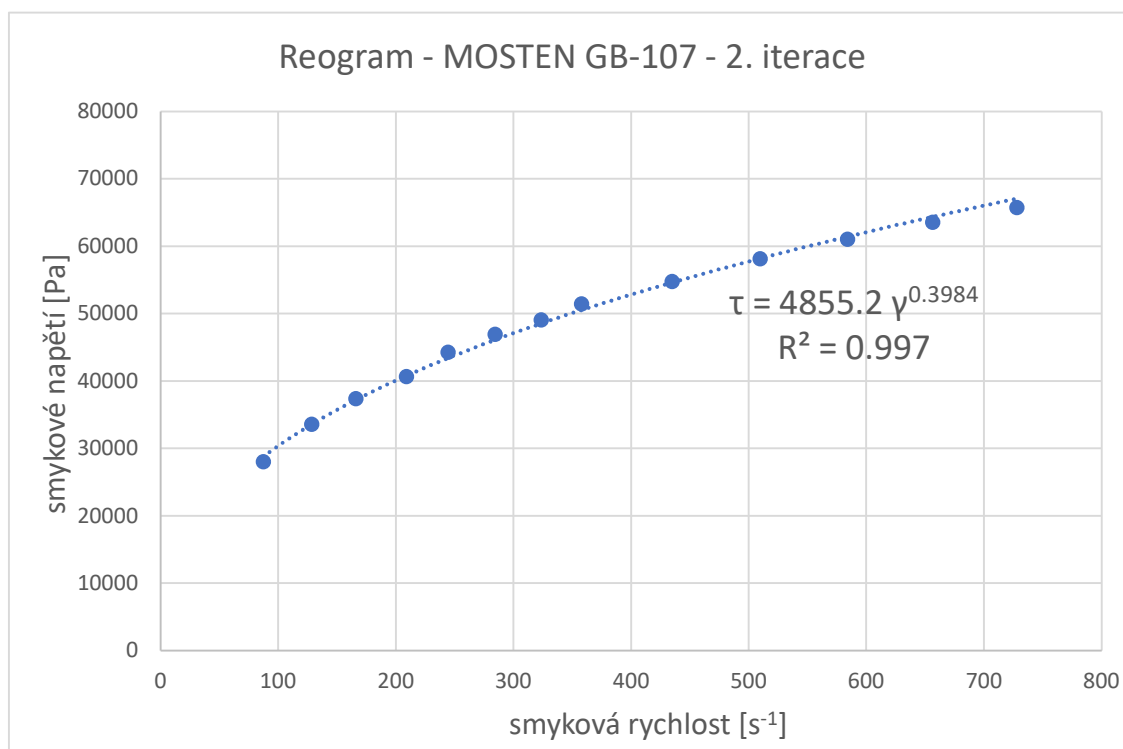
2. iterace smykové rychlosti

$$\dot{\gamma}' = \frac{2 \cdot \dot{V}}{W \cdot H^2} \left(2 + \frac{1}{n}\right) = \frac{2 \cdot 2,055 \cdot 10^{-7}}{0,02 \cdot 0,001^2} \left(2 + \frac{1}{0,3984}\right) = 92,70 \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

otáčky šneku	průměr smyk. napětí	smyková rychlost 2. iterace	průměr smyk. Rychlosti 2. iterace
[min <sup>-1</sup> ]	$\bar{\tau}$ [Pa]	$\dot{\gamma}'$ [s <sup>-1</sup> ]	$\bar{\dot{\gamma}}'$ [s <sup>-1</sup> ]
10	27996.91	92.7	87.00
		81.3	
15	33571.85	132.9	128.32
		123.75	
20	37396.43	167.68	165.80
		163.93	
25	40643.82	211.91	208.77
		205.62	
30	44247.12	246.52	244.21
		241.89	
35	46899.24	287.15	284.24
		281.33	
40	49070.96	325.46	323.46
		321.46	
45	51415.52	355.35	357.59
		359.84	
55	54776.31	436.38	434.67
		432.95	
65	58132.30	505.9	509.43
		512.95	
75	61030.04	584.32	583.89
		583.46	
85	63569.68	655.72	656.21
		656.71	
95	65723.70	722.69	727.68
		732.68	

**Tabulka 8 - Vypočtené hodnoty pro MOSTEN GB-107, 2. iterace**

Z hodnot smykového napětí a 2. iterace smykových rychlostí jsem vytvořil finální závislost smykového napětí na smykové rychlosti.



Obrázek 25 - Reogram MOSTEN GB-107, 2. iterace

### 5.3.3 Scolefin 53-G 10-0

Scolefin 53-G 10-0 je polypropylen, homopolymer, plněný skleněnými kuličkami v množství 30%, určený pro vstřikování. [20]



### 5.3.3.1 Naměřené hodnoty

otáčky šneku	hmotnost nádoby	celková hmotnost	čas měření	tlaková ztráta
$[min^{-1}]$	$m_o [g]$	$m_c [g]$	$t [s]$	$\Delta p [bar]$
160	198.3	392.5	60	166.66
	198.3	392.5	60	169.91
140	198.3	372.3	60	160.31
	198.3	371.6	60	162.92
120	198.3	342.3	60	153.51
	198.3	350.7	60	154.57
100	198.3	325.2	60	144.19
	198.3	327.2	60	143.82
80	198.3	302.9	60	131.72
	198.3	302.0	60	130.88
70	198.3	312.0	75	122.76
	198.3	313.3	75	124.74
60	198.3	315.9	90	114.58
	198.3	324.9	95	117.28
50	198.3	313.1	105	105.75
	198.3	315.0	105	107.96
40	198.3	307.8	125	95.26
	198.3	303.7	120	94.31
35	198.3	312.4	150	88.59
	198.3	313.0	150	89.63
30	198.3	317.7	180	81.52
	198.3	316.5	180	82.52
25	198.3	296.4	180	72.38
	198.3	296.2	180	72.27
20	198.3	289.8	215	63.31
	198.3	288.7	210	63.51
15	198.3	284.2	270	52.81
	198.3	283.8	270	55.40
10	198.3	274.7	360	39.95
	198.3	272.3	360	40.37

Tabulka 9 - Naměřené hodnoty pro SCOLEFIN 53-G 10-0

Tlaková ztráta reprezentuje rozdíl tlaků naměřených na tlakových snímačích B a C s odečtenými počátečními tlaky před zapnutím stroje – tedy při prázdné kapiláře.

$$\text{hustota } \rho = 742 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{šířka kapiláry } W = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{výška kapiláry } H = 0,001 \text{ m}$$

$$\text{délka kapiláry } L = 0,155 \text{ m}$$

### 5.3.3.2 Výpočet pro jeden bod reogramu

hmotnost vyextrudované taveniny

$$m_v = m_c - m_0 = 392,5 - 198,3 = 194,2 \text{ g} = 0,194 \text{ kg} \quad (13)$$

hmotnostní průtok

$$\dot{m} = \frac{m_v}{t} = \frac{0,194}{60} = 3,24 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s} \quad (3)$$

objemový průtok

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{3,24 \cdot 10^{-3}}{742} = 4,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (4)$$

smyková rychlost

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \dot{V}}{W \cdot H^2} = \frac{2 \cdot 4,36 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 0,001^2} = 436,21 \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

hydraulický průměr

$$D_H = \frac{2 \cdot W \cdot H}{W + H} = \frac{2 \cdot 0,02 \cdot 0,001}{0,02 + 0,001} = 1,90 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6)$$

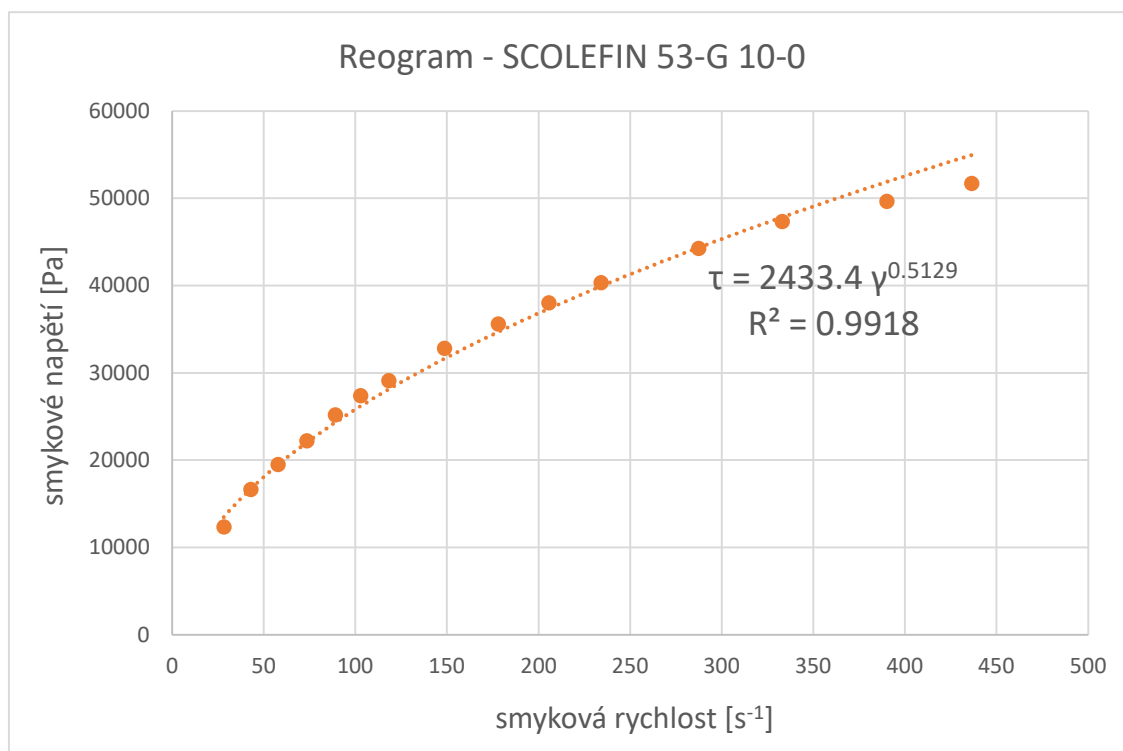
smykové napětí

$$\tau = \frac{D_H \cdot \Delta p \cdot 10^5}{4 \cdot L} = \frac{1,90 \cdot 10^{-3} \cdot 166,66 \cdot 10^5}{4 \cdot 0,155} = 51201,60 \text{ Pa} \quad (8)$$

otáčky šneku	smyková rychlost	smykové napětí	průměr smyk. rychlostí	průměr smyk. napětí
$[min^{-1}]$	$\dot{\gamma} [s^{-1}]$	$\tau [Pa]$	$\bar{\gamma} [s^{-1}]$	$\bar{\tau} [Pa]$
160	436.21	51201.60	436.21	51700.83
	436.21	52200.07		
140	390.84	49250.39	390.05	49651.33
	389.26	50052.27		
120	323.45	47162.03	332.88	47324.78
	342.32	47487.54		
100	285.04	44299.22	287.29	44241.61
	289.53	44184.01		
80	234.95	40466.29	233.94	40337.82
	232.93	40209.36		
70	204.31	37714.32	205.48	38018.59
	206.65	38322.85		
60	176.10	35200.34	177.85	35615.34
	179.60	36030.33		
50	147.35	32489.17	148.57	32828.65
	149.79	33168.14		
40	118.06	29265.88	118.22	29120.11
	118.37	28974.34		
35	102.52	27218.08	102.79	27377.34
	103.05	27536.60		
30	89.40	25044.22	88.95	25198.46
	88.50	25352.70		
25	73.45	22237.42	73.38	22220.72
	73.30	22204.01		
20	57.36	19451.53	57.69	19481.69
	58.02	19511.85		
15	42.88	16223.13	42.78	16621.37
	42.68	17019.62		
10	28.60	12273.71	28.15	12337.34
	27.70	12400.97		

Tabulka 10 - Vypočtené hodnoty pro SCOLEFIN 53-G 10-0

Z těchto hodnot jsem vytvořil reogram pro závislost smykového napětí na smykové rychlosti. Body reogramu jsem proložil mocninovým modelem toku čistě viskózních neneutonských látek.



Obrázek 26 - Reogram SCOLEFIN 53-G 10-0

Rovnice mocninového modelu má pro naše využití obecný tvar

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

kde  $n$  je index toku a  $K$  je koeficient konzistence. Z předpisu funkce křivky naměřeného reogramu  $\tau = 2433.4 \cdot \dot{\gamma}^{0,5129}$  jsem určil, že je index toku  $n = 0,5129$  a koeficient konzistence  $K = 2433.4$ . Zjištěný index toku jsem použil k určení druhé iterace smykové rychlosti.

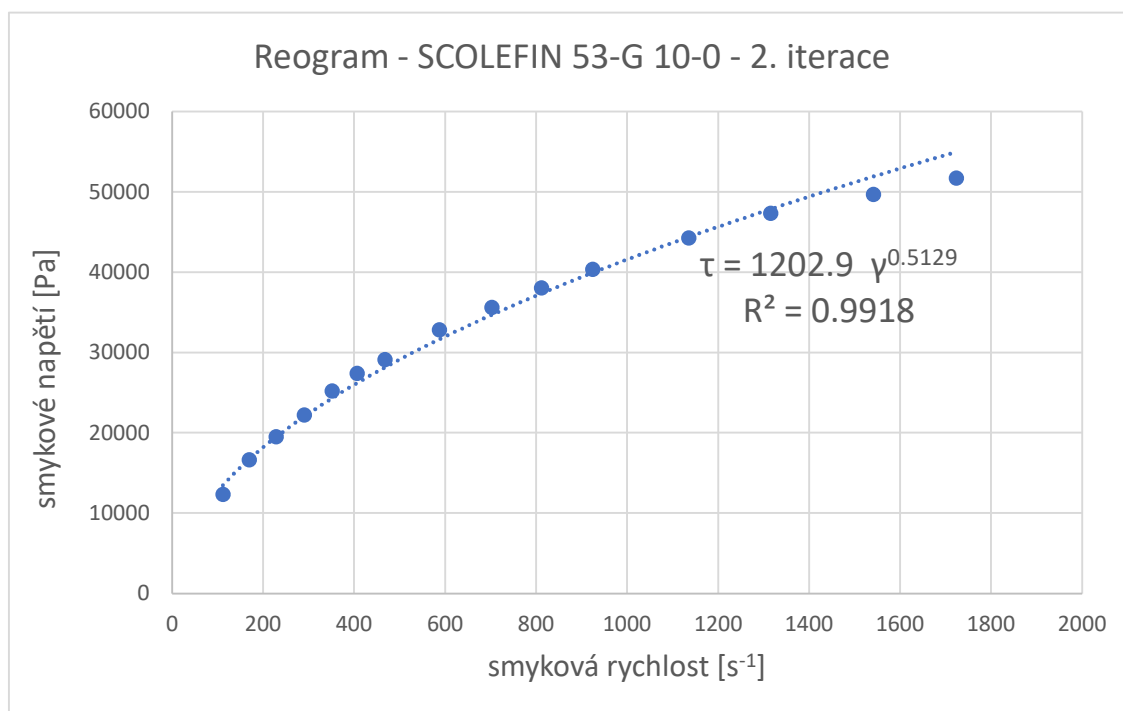
2. iterace smykové rychlosti

$$\dot{\gamma}' = \frac{2 \cdot \dot{V}}{W \cdot H^2} \left( 2 + \frac{1}{n} \right) = \frac{2 \cdot 4,36 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 0,001^2} \left( 2 + \frac{1}{0,5129} \right) = 1722,89 \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

otáčky šneku	průměr smyk. napětí	smyková rychlost 2. iterace	průměr smyk. Rychlosti 2. iterace
[min <sup>-1</sup> ]	$\bar{\tau}$ [Pa]	$\dot{\gamma}'$ [s <sup>-1</sup> ]	$\bar{\gamma}'$ [s <sup>-1</sup> ]
160	51700.83	1722.89	1722.89
		1722.89	
140	49651.33	1543.68	1540.58
		1537.47	
120	47324.78	1277.53	1314.79
		1352.05	
100	44241.61	1125.82	1134.70
		1143.57	
80	40337.82	927.98	923.99
		920.00	
70	38018.59	806.97	811.59
		816.20	
60	35615.34	695.54	702.45
		709.37	
50	32828.65	581.99	586.80
		591.62	
40	29120.11	466.30	466.92
		467.54	
35	27377.34	404.91	405.97
		407.04	
30	25198.46	353.10	351.32
		349.55	
25	22220.72	290.11	289.81
		289.51	
20	19481.69	226.54	227.84
		229.14	
15	16621.37	169.35	168.96
		168.56	
10	12337.34	112.97	111.192
		109.42	

Tabulka 11 - Vypočtené hodnoty pro SCOLEFIN 53-G 10-0, 2. iterace

Z hodnot smykového napětí a 2. iterace smykových rychlostí jsem vytvořil finální závislost smykového napětí na smykové rychlosti.

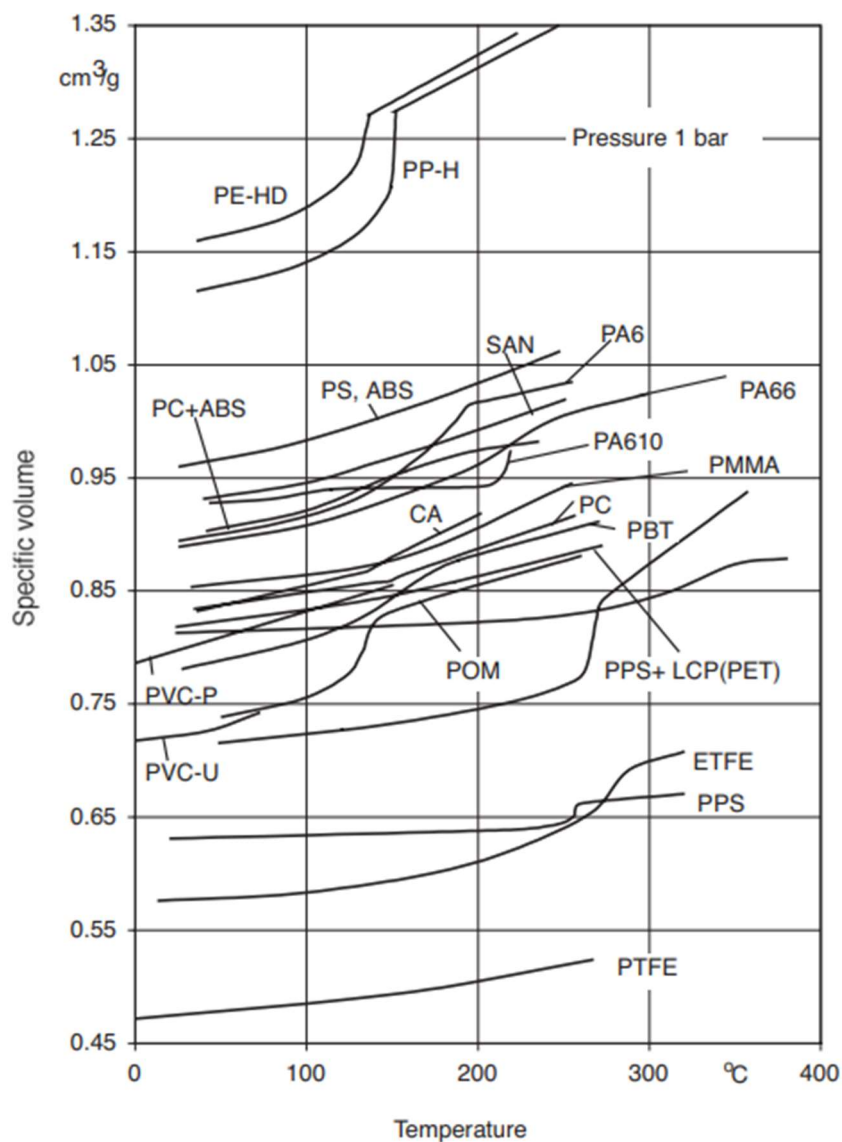


Obrázek 27 - Reogram SCOLEFIN 53-G 10-0, 2. iterace

## 5.4 Hustota taveniny

Výpočty jsem původně prováděl s hustotou polymeru udávanou výrobcem v materiálovém listu. Tyto hustoty jsou ale udávány dle normy ISO 1183, která předepisuje testování v přirozené atmosféře bez kontroly vlhkosti, proudění vzduchu a v teplotním rozsahu 18 – 28°C (ISO 291). Jedná se tedy o hustotu pevné fáze. [1]

Ze závislosti měrného objemu na teplotě pro různé druhy polymerů na obrázku 28 je zřejmé, že měrný objem (reciproční veličina k hustotě) se mění v závislosti na teplotě. Proto jsem původní postup přehodnotil a vyhodnocení výsledků provedl pro hodnoty odečtené z grafu na obrázku 28, které jsou bližší reálným hodnotám.



Obrázek 28 - Závislost měrného objemu na teplotě pro různé druhy polymerů při tlaku 1 bar [1]

K dispozici bohužel nemáme zařízení, které by reálnou hustotu taveniny bylo schopno měřit. Pro tyto účely provedu návrh možností měření taveniny polymeru.

#### 5.4.1 Návrh zařízení pro měření hustoty polymerů

Jelikož na naší fakultě nemáme k dispozici desimetr pro měření při vysokých teplotách a neumíme tak hustoty tavenin polymerů měřit, krátce jsem se zamyslel nad možnostmi návrhu takového zařízení.

Základními předpoklady pro měření hustoty tavenin polymerů jsou ohřev do 350 °C, odečtení objemu a sledování aktuální teploty taveniny.

#### 5.4.1.1 Ohřev

Teploty pro vstřikování polymerů se pohybují v rozmezí od 200 do 350 °C. Tyto teploty je možné zajistit pomocí plynového hořáku, kde se teploty plamene u standartních hořáků pohybují od 800 do 1600 °C.

#### 5.4.1.2 Odečtení objemu

Nejjednodušším řešením pro zjištění objemu je opticky odečíst výšku hladiny ze stupnice na nádobě. Proto je jednou z variant skleněná nádoba s vysokou tepelnou odolností. Nabízí se použití kádinky či baňky z borosilikátového skla s nízkou tepelnou roztažností, které má teplotní odolnost okolo 800 °C. Nevýhodou této metody je přítomnost kapilárních jevů, které znepřesňují odečet výšky hladiny ze stupnice na boku nádoby.

Další možností, která zahrnuje automatizaci, je měření výšky hladiny pomocí vertikálně posuvného teplotního čidla, které by zaznamenalo hladinu díky rázové změně teploty. Odečtení výšky hladiny by pak provedl systém, který by hlídal polohu čidla. Výhodou této varianty je přesnější odečet a odstranění nároku na nádobu z teplotně odolného skla.

#### 5.4.1.3 Sledování teploty

Sledování teploty by zajišťovalo ponorné teplotní čidlo.

### 5.4.2 Komerční měření hustoty tavenin polymerů

Metod pro stanovení hustoty tavenin polymerů existuje několik. Nejdostupnějším způsobem je využití přístroje pro stanovení indexu toku taveniny (Melt Flow Indexer) a kombinování metod měření MFR a MVR. Jelikož jednotkou MFR je g/10min a MVR je cm<sup>3</sup>/10min, je možné z jejich kombinace stanovit hustotu taveniny, jak je vidět z rovnic 14, 15, 16. [22]

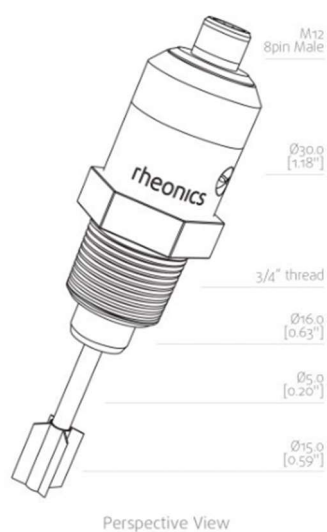
$$MFR = \frac{600 \cdot m}{t} [g/10min] \quad (14)$$

$$MVR = \frac{600 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L}{t} [cm^3/10min] \quad (15)$$



$$\rho_m \left[ \frac{g}{cm^3} \right] = \frac{MFR [g/10min]}{MVR [cm^3/10min]} \quad (16)$$

Další možnou variantou je inline SRD měřič od firmy Rheonics, který měří viskozitu a hustotu. Zařízení funguje na principu torzního rezonátoru, kdy s rostoucí viskozitou roste i mechanické tlumení. Samotný senzor je možné instalovat prakticky do jakéhokoli procesu, protože rychlost toku nemá vliv na výsledky měření a teplotní rozsah je od -40°C do 300°C. Firma Rheonics také nabízí samostatný přístroj SR-STCM, který využívá právě tento senzor a poskytuje měření do 200 °C. [23,24]



**Obrázek 29 - SRD senzor od firmy Rheonics [23]**

## 5.5 Průtok taveniny

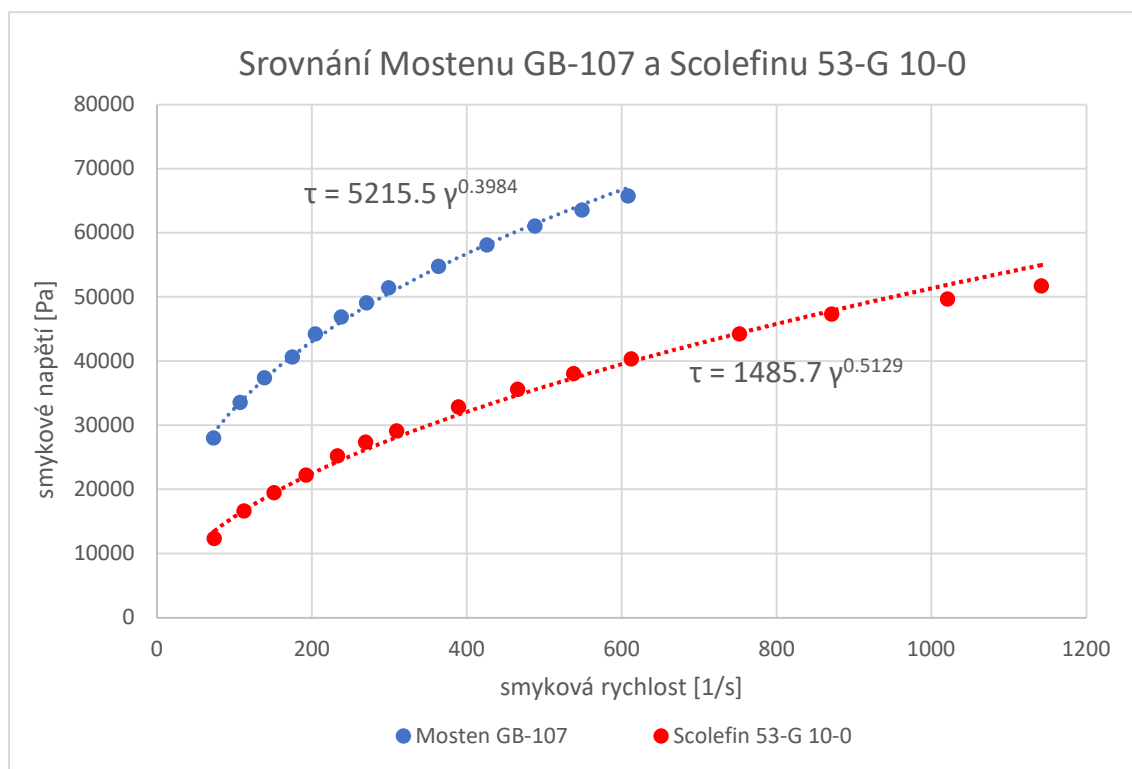
Průtok taveniny jsem zjišťoval pomocí hmotnosti vytlačeného vzorku za určitý čas. Jedná se o jedinou možnou metodu v našich podmínkách, která s sebou ale přináší nové nepřesnosti, a to jak při měření času, kdy záleží na reakci člověka, tak také při oddělování proudu taveniny při začátku a konci měření.

Další možnou metodou by mohlo být využití vysokorychlostní kamery těsně u výstupu z kapiláry. Výhodou tohoto způsobu by mohla být případná automatizace. Při našem měření jsme předpokládali čistě viskózní chování taveniny bez viskoelastických efektů. Viskoelastické efekty by ale při použití vysokorychlostní kamery značně navýšovaly nepřesnost měření.

## 5.6 Plniva

Teoretický předpoklad byl, že kuličkové plnivo snižuje odpor taveniny k toku. Mosten GB-107 i Scolefin 53-G 10-0 jsou oba polypropyleny s homopolymerní stavbou určené pro vstřikování. Scolefin navíc obsahuje 30% skleněného kuličkového plniva. Tyto materiály nám tedy nabízejí praktický náhled na vliv plniva na tokové vlastnosti.

V reogramu na obrázku 30 je vidět, že křivka Scolefinu se obecně pohybuje pod úrovní křivky Mostenu a má tedy nižší odpor vůči toku. Zároveň lze u Scolefinu pozorovat větší snižování změny smykového napětí s rostoucí smykovou rychlostí. Naše měření v tomto případě potvrzuje počáteční předpoklad vycházející z literární rešerše.



Obrázek 30 - Reogram závislosti smykového napětí na smykové rychlosti pro Mosten GB-107 a Scolefin 53-G 10-0

## 5.7 Další poznatky z měření

### 5.7.1 Odběr vytlačené taveniny

Jedním z praktických problémů, na které jsme při experimentálním měření na extruderu narazili, je nedořešený výstup z kapiláry na konci extruderu.

Zakončení kapiláry je prakticky v rovině se širším čelem reometrické hlavy. Při otáčkách pod 15 ot/min je měření ztížené, protože se tavenina svou výstupní rychlostí dostatečně nevzdálí od čela a často se ho dotkne. Následně se pak začne lepit a stékat po čele a měření je tak prakticky nemožné provést. Na obrázku 31 je vidět proud taveniny při vyšší rychlosti. Proto jsem měření prováděl od 10 ot/min výše.

V případě projektování nové hlavy extruderu bych doporučoval povytáhnout vyústění kapiláry spolu s menším průměrem o 10 mm před vlastní čelo hlavy.



*Obrázek 31 - Čelo s pohledem na větší a menší průměr reometrické hlavy*

### 5.7.2 Magnet

Při odstraňování nečistot šroubovákem s magnetickým koncem jsme si všimli lehkých změn směru a tvaru toku taveniny. Teoreticky by vytékající tavenina mohla být nabitá statickou elektřinou ze tření v kapiláře. Tento jev jsme se snažili ověřit pomocí magnetu z domácích potřeb, který jsme umístili na čelo reometrické hlavy, u kterého jsme se stejné reakce nedočkali. Důležitým aspektem neúspěchu může být vysoká teplota čela, kvůli které se síla magnetu

výrazně sníží. Na tento jev může mít pravděpodobně vliv i samotný druh polymeru a jeho plniva.



Obrázek 32 - Vliv magnetického konce šroubováku na vytékání taveniny

## 5.8 Shrnutí výsledků

V následující tabulce je shrnutí výsledků pro měřené materiály. Pro lepší srovnání odporu jednotlivých tavenin vůči toku jsem dopočítal napětí na stěně  $\tau_w$  pro smykovou rychlost  $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$ , kterou jsem dosadil do rovnice mocninového modelu toku s určenými koeficienty  $K$  a  $n$ . Hodnota  $\tau_w$  je tedy určena pro všechny tři materiály za totožných podmínek toku a zjednodušuje porovnání odporů. Z údajů vyplývá, že nejlépe tekli Scolefin 53-G 10-0 a největší odpor kladl Liten MB-61.

	$K [\text{Pa}\cdot\text{s}]$	$n [-]$	$\tau_w [\text{Pa}]$
<b>Liten MB-61</b>	1429,2	0,7064	36973,71
<b>Mosten GB-107</b>	4855,2	0,3984	30409,35
<b>Scolefin 53-G 10-0</b>	1202,9	0,5129	12765,26

Tabulka 12 - Srovnání výsledků,  $\tau_w$  určeno pro  $\dot{\gamma} = 100 \text{ s}^{-1}$

## Závěr

V rešeršní části práce jsem popsal základní dělení polymerů dle chování v okolí teploty tavení, tvaru a velikosti makromolekul. Dále jsem se zaměřil na reologii, tokové vlastnosti tavenin polymerů, metody jejich měření a vyhodnocování.

V experimentální části jsem provedl měření třech polymerů na extruderu s připojenou reometrickou hlavou s obdélníkovou kapilárou. Z naměřených hodnot jsem vypočítal závislosti smykových napětí na smykových rychlostech. Výsledné reogramy vyšly v souladu s popisem tokových vlastností v rešerši, kde uvádím, že s rostoucí smykovou rychlostí se snižuje změna smykového napětí a analogicky se tedy zpomaluje nárůst viskozity se smykovou rychlostí. Srovnání dvou polypropylenů Mostenu GB-107 a Scolefinu 53-G 10-0 s 30% skleněných kuliček potvrdilo, že kuličkové plnivo snižuje odpor taveniny vůči toku.

Výpočty jsem prováděl s hustotou z grafu závislosti měrného objemu na teplotě, který je stanoven pro základní druhy polymerů a neudává přesně reálnou hustotu konkrétní taveniny. Z tohoto důvodu jsem se v rámci vyhodnocení zamyslel nad možnostmi měření hustoty tavenin polymerů.

Při měření jsme narazili na zajímavý jev, kdy tavenina lehce reagovala na přiblížený magnet. Reálné důvody tohoto úkazu a jeho opakovatelnost jsme ale z časových důvodů neměli možnost blíže zkoumat.

## Seznam použitých symbolů

znak	název veličiny	jednotka
$t$	čas	[s]
$V$	objem	[m <sup>3</sup> ]
$\rho$	hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta p$	tlaková ztráta	[Pa]
$L$	délka kapiláry	[m]
$D_H$	hydraulický průměr	[m]
$W$	šířka obdélníkové štěrbin	[m]
$H$	výška obdélníkové štěrbin	[m]
$\tau$	smykové napětí	[Pa]
$K$	koeficient konzistence	[-]
$\bar{u}$	střední rychlost toku	[m/s]
$n$	index toku	[-]
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace	[s <sup>-1</sup> ]
$\dot{V}$	objemový tok	[m <sup>3</sup> /s]
$\eta$	viskozita	[Pa.s]
$m_v$	hmotnost vytlačeného vzorku	[kg]
$m_0$	hmotnost nádoby	[kg]

## Použité zdroje a literatura

- [1] OSSWALD, Tim A. *International plastics handbook: the resource for plastics engineers*. Cincinnati: Hanser, 2006. ISBN 978-1-56990-399-5.
- [2] HOLUBOVÁ, Renata. Základy reologie a reometrie kapalin [online]. Olomouc, 2014 [cit. 2020-12-07]. Dostupné z: [http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady\\_reologie.pdf](http://mofychem.upol.cz/KA6/Zaklady_reologie.pdf)
- [3] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Praha: BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. Polymery [online]. Code Creator, 2016 [cit. 2021-02-05]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [5] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987.
- [6] Měření tokových vlastností [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, ÚFMI [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_pol/FP\\_05.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_05.pdf)
- [7] Rheological measurements. *Anton Paar* [online]. [cit. 2021-03-07]. Dostupné z: <https://wiki.anton-paar.com/cz-cs/zaklady-reologie/reometricke-mereni/>
- [8] SOPOUŠEK, Jiří. Základy reologie a reometrie kapalin. *Informační systém Masarykovy univerzity: Studijní materiály* [online]. 22.9.2006 [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/sci/jaro2010/C4680/um/2457585/2457594/Reologie\\_a\\_reometrie\\_kapalin.pdf](https://is.muni.cz/el/sci/jaro2010/C4680/um/2457585/2457594/Reologie_a_reometrie_kapalin.pdf)
- [9] ZIKMUND, Ondřej. *Přesnost stanovení viskozity kapalin* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=68412](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68412). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Ing. Martin Frk, Ph. D.
- [10] PIPE, Christopher J., Trushant S. MAJMUDAR a Gareth H. MCKINLEY. High shear rate viscometry. *Rheologica Acta* [online]. červenec 2008, 5(47), 621-642 [cit. 2021-6-1]. ISSN 1435-1528. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/225767121\\_High\\_shear\\_rate\\_viscometry](https://www.researchgate.net/publication/225767121_High_shear_rate_viscometry). doi:10.1007/s00397-008-0268-1

- [11] Hmotnostní (MFR) a objemový (MVR) index toku taveniny. *JD DVOŘÁK, s.r.o.* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/stanoveni-hmotnostniho-mfr-objemoveho-mvr-indexu-toku-taveniny>
- [12] Tokové chování polymerních tavenin: Reologické modely. *Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně: Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_pol/FP\\_02.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_02.pdf)
- [13] KRATEJL, Daniel. *Tokové vlastnosti tavenin polymerů*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Jan Skočilas, Ph.D.
- [14] 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. 2021-06-01]. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2011.04.014. ISSN 01429418. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941811000729>
- [15] *BOCO Pardubice: Laboratorní extrudery EB-L* [online]. Pardubice [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.boco.cz/laboratorni-extrudery-eb-l>
- [16] Types of Flow and Rheology Models of Drilling Mud. *DrillingFormulas* [online]. 14. února 2016 [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.drillingformulas.com/types-of-flow-and-rheology-models-of-drilling-mud/>
- [17] Unipetrol RPA - Product Information: LITEN MB 61. *Nevicolor* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.nevicolor.it/prodotti/ricerca-polimero/unipetrol/liten-hdpe/allegati/liten-mb-61-mfr-7-dgmin-2.16-kg.pdf>
- [18] Mosten. *ORLEN Unipetrol: MOSTEN* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.pp-mosten.cz/product/mosten>
- [19] PP MOSTEN GB 107. *ORLEN Unipetrol: Mosten* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: [https://www.pp-mosten.com/Mosten/media/content/PDF\\_CZ/TDS-GB-107.pdf](https://www.pp-mosten.com/Mosten/media/content/PDF_CZ/TDS-GB-107.pdf)
- [20] *RESINEX: POLYPROPYLEN SCOLEFIN* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.resinex.cz/produkty/scolefin.html>
- [21] *Scolefin 53 G 10-0* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <http://catalog.ides.com/Datasheet.aspx?l=26793&E=387937>
- [22] Measuring the Melt Density of a Polymer using a Melt Indexer. *AZO Materials* [online]. Dynisco, 3. dubna 2020 [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=19176>



[23] SRD: Inline měřič hustoty procesu a viskozimetr. *Rheonics* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://cs.rheonics.com/produkty/inline-m%C4%9B%C5%99i%C4%8D-hustoty-srd/>

[24] Měření reologických vlastností polymerních tavenin v reálném čase. *Rheonics* [online]. [cit. 2021-6-1]. Dostupné z: <https://cs.rheonics.com/solutions-item/real-time-rheology-measurements-of-polymer-melts/>

[25] KAŽYS, R. a R. REKUVIENE. Viscosity and density measurement methods for polymer melts. *ULTRASOUND* [online]. 2011, 4(66) [cit. 2021-6-1]. ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS. Dostupné z: [https://www.ndt.net/article/ultragarsas/Vol.66-No.4-2011\\_02-Rekuviene.pdf](https://www.ndt.net/article/ultragarsas/Vol.66-No.4-2011_02-Rekuviene.pdf)

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Struktura reaktoplastů [4] .....	9
Obrázek 2 - Struktura semikrystalických termoplastů [4] .....	10
Obrázek 3 - Struktura elastomerů [4] .....	11
Obrázek 4 - Struktura termoplastických elastomerů [4] .....	12
Obrázek 5 - Molekulární struktura polymerů [4] .....	12
Obrázek 6 - Závislost viskozity termoplastů na velikosti smykové rychlosti [1] ....	16
Obrázek 7 – Křivky smykové a elongační viskozity pro dva druhy polystyrenu [1]	17
Obrázek 8 - Závislost hmotnostního (1) a objemového indexu toku taveniny PP plněného mikromletým vápencem na jeho obsahu – MFI [g/10min] 49,03/230 [3] .....	18
Obrázek 9 - Mocninový model [16].....	19
Obrázek 10 - Rychlostní profily polymerních tavenin [6] .....	21
Obrázek 11 - Průtokové viskozimetry [2] .....	22
Obrázek 12 - Höpplerův pádový viskozimetr [2].....	23
Obrázek 13 – Typy uspořádání rotačního reometru [2] .....	23
Obrázek 14 - Kapilární reometr [8] .....	24
Obrázek 15 - Princip kapilárního reometru .....	25
Obrázek 16 - Extruder EB - L30 .....	27
Obrázek 17 - Řez extruderem a reometrickou hlavou.....	27
Obrázek 18 - Váha AND HF-2000G .....	28
Obrázek 19 - Mosten (čirý) se zbytky Scolefinu (bílý pruh) .....	29
Obrázek 20 - Čistý Mosten .....	29
Obrázek 21 - Srovnání odlitku z Litenu (vlevo) a Mostenu (vpravo).....	29
Obrázek 22 - Reogram LITEN MB-61 .....	33
Obrázek 23 - Reogram LITEN MB-61, 2. iterace .....	34
Obrázek 24 - Reogram MOSTEN GB-107 .....	38
Obrázek 25 - Reogram MOSTEN GB-107, 2. iterace .....	40
Obrázek 26 - Reogram SCOLEFIN 53-G 10-0 .....	44
Obrázek 27 - Reogram SCOLEFIN 53-G 10-0, 2. iterace.....	46
Obrázek 28 - Závislost měrného objemu na teplotě pro různé druhy polymerů při tlaku 1 bar [1].....	47
Obrázek 29 - SRD senzor od firmy Rheonics [23] .....	49
Obrázek 30 - Reogram závislostí smykového napětí na smykové rychlosti.....	50
Obrázek 31 - Čelo s pohledem na větší a menší průměr reometrické hlavy.....	51
Obrázek 32 - Vliv magnetického konce šroubováku na vytékání taveniny .....	52

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Korekční součinitele [13] .....	20
Tabulka 2 - Parametry extruderu EB - L30 od firmy BOCO [15].....	26
Tabulka 3 - Naměřené hodnoty pro LITEN MB-61 .....	31
Tabulka 4 - Vypočtené hodnoty pro LITEN MB-61 .....	32
Tabulka 5 - Vypočtené hodnoty pro LITEN MB-61, 2. iterace .....	34
Tabulka 6 - Naměřené hodnoty pro MOSTEN GB-107 .....	35
Tabulka 7 - Vypočtené hodnoty pro MOSTEN GB-107 .....	37
Tabulka 8 - Vypočtené hodnoty pro MOSTEN GB-107, 2. iterace .....	39
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty pro SCOLEFIN 53-G 10-0 .....	41
Tabulka 10 - Vypočtené hodnoty pro SCOLEFIN 53-G 10-0 .....	43
Tabulka 11 - Vypočtené hodnoty pro SCOLEFIN 53-G 10-0, 2. iterace .....	45
Tabulka 13 - Srovnání výsledků, $\tau_w$ určeno pro $\gamma = 100 \text{ s}^{-1}$ .....	52