

# **Posouzení kvality měření smykové viskozity na kapilárním reometru s jednou tryskou**

Jan Šimurda

---

Bakalářská práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan ŠIMURDA  
Osobní číslo: T10791  
Studijní program: B3909 Procesní inženýrství  
Studijní obor: Technologická zařízení  
Forma studia: prezenční

Téma práce: Posouzení kvality měření smykové viskozity na kapilárním reometru s jednou tryskou

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma.
2. Příprava podkladů pro experimentální část.
3. Provedení experimentální části.
4. Vyhodnocení naměřených výsledků.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího BP.**

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. David Maňas, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **8. února 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013

  
doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.  
děkan



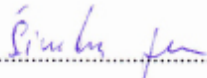
  
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
ředitel ústavu

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užit své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 14.5.2013

  
.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být těž nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>21</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě díla vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>22</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Hlavním záměrem je seznámení s problematikou polymerních materiálů a jejich chováním při tepelném a tlakovém zatížení. S tím související problematika viskozity, její druhy a rozdělení. V této práci pro posouzení jednotlivých veličin se bude pracovat s kapilárním reometrem s jednou tryskou. Byly vybrány 3 druhy polymerních materiálů: PVC, HDPE a PET. Na těchto materiálech bude měřena závislost viskozity na teplotě pro různé délky a průměry kapiláry. Vyhodnocení provedených měření pro každý materiál, jeho rozdílnost nebo podobnost křivek pro různá L/D. A následnou modelací toku v programu 2DFem VEL© a porovnání reálného měření s modelovými hodnotami a objasnění výsledků.

Klíčová slova: kapilární reometr, smyková viskozita, modelování toku, reologie, polymery.

## **ABSTRACT**

The main intention is introduction to the subject of polymeric materials and their behavior during thermal during thermal and pressure loads. Together with the issue of viscosity. In this work, the assessment of individual variables will work with a capillary rheometer with a single nozzle. I have selected three kinds of polymer materials: PVC, HDPE and PET. In these materials the measured dependence of viscosity on temperature for different lengths and diameters of the capillaries. Evaluation of the measurements for each material, the difference or similarity of the curves for different L/D. A subsequent modeling of flow in the 2DFem © VEL and comparing real measurements with model values and clarify the results.

Keywords: capillary rheometer, shear viscosity, flow modeling, rheology, polymers.

**OBSAH**

<b>I TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>10</b>
<b>1 POLYMERY.....</b>	<b>11</b>
1.1 OBECNÉ ROZDĚLENÍ A CHARAKTERISTIKA .....	12
1.1.1 Makromolekulární struktura polymerů .....	15
1.1.2 Molekulová hmotnost.....	17
1.2 TERMOPLASTY A ROZDĚLENÍ.....	20
1.2.1 Uspořádání molekul polymeru.....	20
1.2.2 Termoplastické polymery.....	20
1.2.3 Amorfnní termoplasty .....	21
1.2.4 Semi-krystalické termoplasty.....	21
1.3 POLYMEROVÉ PŘÍSAKY .....	23
1.3.1 Změkčovadla .....	23
1.3.2 Přísady zpomalující hoření.....	24
1.3.3 Stabilizátory .....	24
1.3.4 Antistatická činidla.....	24
1.3.5 Plniva.....	25
1.4 REAKTOPLASTY.....	25
1.5 PLASTICKÝ STAV TERMOPLASTŮ .....	26
<b>2 REOLOGIE .....</b>	<b>28</b>
2.1 VŠEOBECNÁ CHARAKTERISTIKA.....	28
2.2 ZÁKLADNÍ DEFINICE.....	28
2.2.1 Pseudoplastické chování polymerů .....	33
2.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	37
2.3.1 Kapilární reometr .....	37
<b>3 MODELOVÁNÍ TOKU.....</b>	<b>41</b>
3.1 ZPŮSOBY MODELOVÁNÍ.....	42
3.2 PROGRAM VIRTUAL EXTRUSION LABORATORY A JEJÍ MODUL 2DFEM.....	44
<b>4 CÍL PRÁCE .....</b>	<b>47</b>
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>48</b>
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ.....</b>	<b>49</b>
5.1 POSTUP MĚŘENÍ.....	49
5.2 MĚŘENÍ VYBRANÝCH MATERIÁLU NA KAPILÁRNÍM REOMETRU .....	50
<b>6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÝCH VSKOZIT .....</b>	<b>56</b>
<b>7 MODELOVÁNÍ TOKU .....</b>	<b>59</b>
7.1 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ MĚŘENÍ PROVEDENÝCH NA REOMETRU .....	72
7.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MODELOVÁNÍ S MĚŘENÝMI HODNOTAMI .....	78
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>84</b>

---

<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>85</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>86</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>87</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>89</b>
<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>90</b>
<b>SEZNAM ROVNIC .....</b>	<b>91</b>



## ÚVOD

Na přelomu 19. a 20. století, hledali vědci náhradu za vyčerpateľné přírodní zdroje jako je gumu, korek, hedvábí a spousta dalších surovin. Bylo zjištěno, že vedlejším produktem rafinace ropy a uhlí lze vytvářet syntetické materiály s různou tvrdostí a tvárností. A tehdy jsme poprvé slyšeli slovo plasty. Ty se těší velikému rozmachu již mnoho let a využívají se dnes již v naprosto každém odvětví od medicíny až k předmětům denní potřeby. Setkáváme se s nimi takřka na každém kroku. Troufám si říci, že dnes již neexistuje výrobek, který by neobsahoval části z polymerních materiálů, ať už se jedná o funkční či designovou část. Plastové díly nahrazují kovové stále častěji, živým důkazem je automobilový průmysl, který se snaží plastovými díly nahrazovat stávající kovové díly, jenž jsou drahé, těžké a mají tím samozřejmě vliv na spotřebu, cenu a tím i na ekologii ve světě.

Reologické vlastnosti polymerních materiálů jsou pro výrobce klíčové, žádný výrobní proces se dnes neobejde bez stanovení reologických charakteristik daného materiálu. Pro výrobce je nezbytné, aby popis tokových vlastností polymerů jednoznačně určil jeho aplikační možnosti a způsob zpracování. V této práci se zaměříme především na tokové vlastnosti tří druhů polymerů, včetně problematiky smykové viskozity a jejich chování v dutině reometru. Dále porovnání reálného měření s modelováním toku v programu 2DFem VEL<sup>®</sup> a vyhodnocení naměřených a modelovaných dat.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

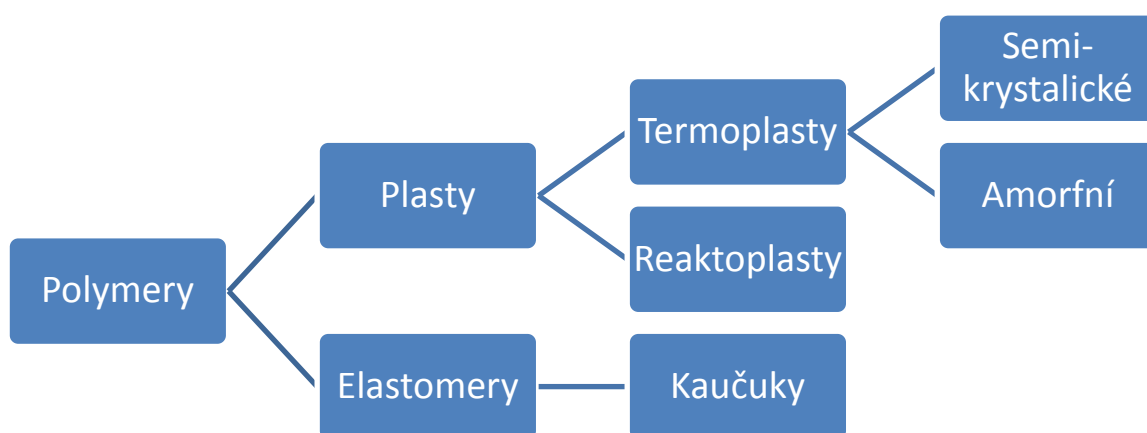
## 1 POLYMERY

Jak již název napovídá slovo „polymery“ jsou materiály, které se skládají z molekul o vysoké molekulové hmotnosti. Tyto velké molekuly nazýváme makromolekuly. Polymery se svými materiálovými vlastnostmi a všestrannými metodami zpracování jsou připisovány molekulární struktuře. Snadnost, se kterou jsou polymery, a plasty zpracováváné z nich dělá pro spoustu aplikací ty nejvíce vyhledávané materiály vůbec. Jejich nízká hustota a schopnost tavitelnosti při relativně nízkých teplotách v porovnání s tradičními materiály jako jsou kovy. Polymery a plasty jsou materiály, jenž kloubí dohromady vlastnosti několika potřebných částí v jeden samostatný celek. V mnoha případech tradiční výrobky vyrobené ze dřeva, kovu, keramiky nebo skla jsou nyní vyrobeny z plastu. (Osswald, 1998)

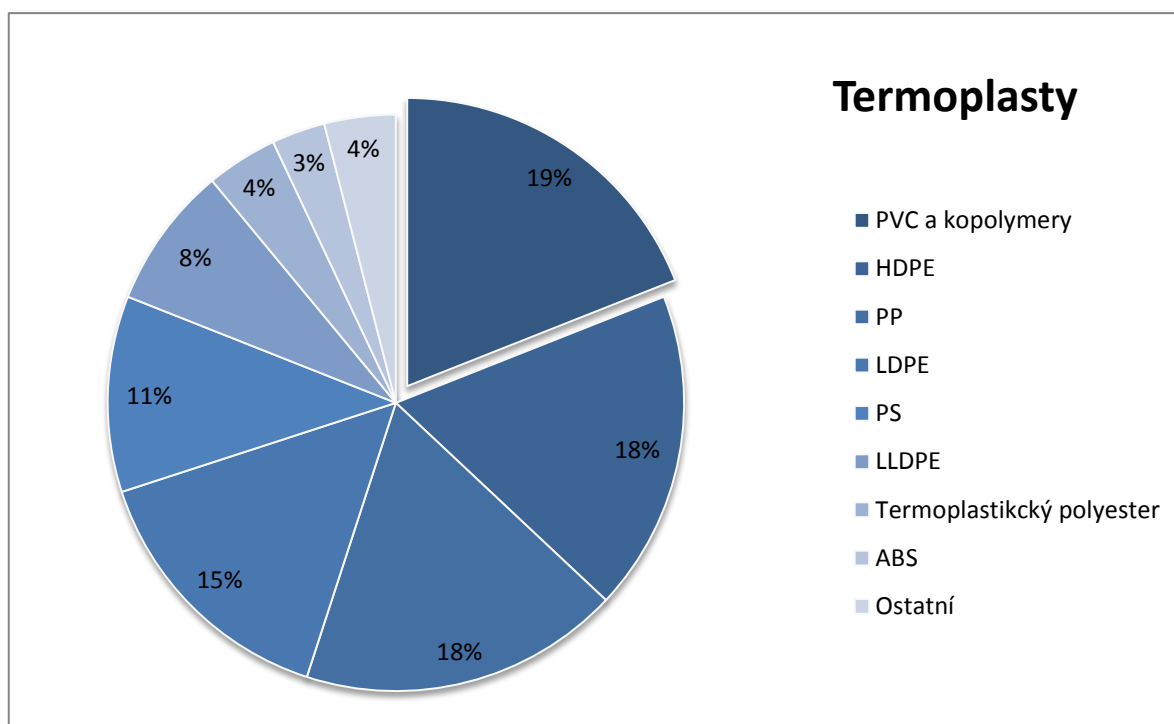
Hlavní výhodou výrobků z plastu je jejich pevnost, tvárnost, hmotnost a dobrá obrobiteľnosť včetně dobrých tepelně-izolačních vlastností. Na rozdíl od kovů nepodléhají korozi, což je výhodné obzvláště u výrobků, které byly vyrobeny pro dlouhodobé použití. Problém nastává v okamžiku likvidace těchto výrobků. Některé plasty se obtížně recyklují. Hlavní složkou jsou makromolekulární organické sloučeniny přírodního ev. syntetického původu. (Osswald, 1998)

## 1.1 Obecné rozdělení a charakteristika

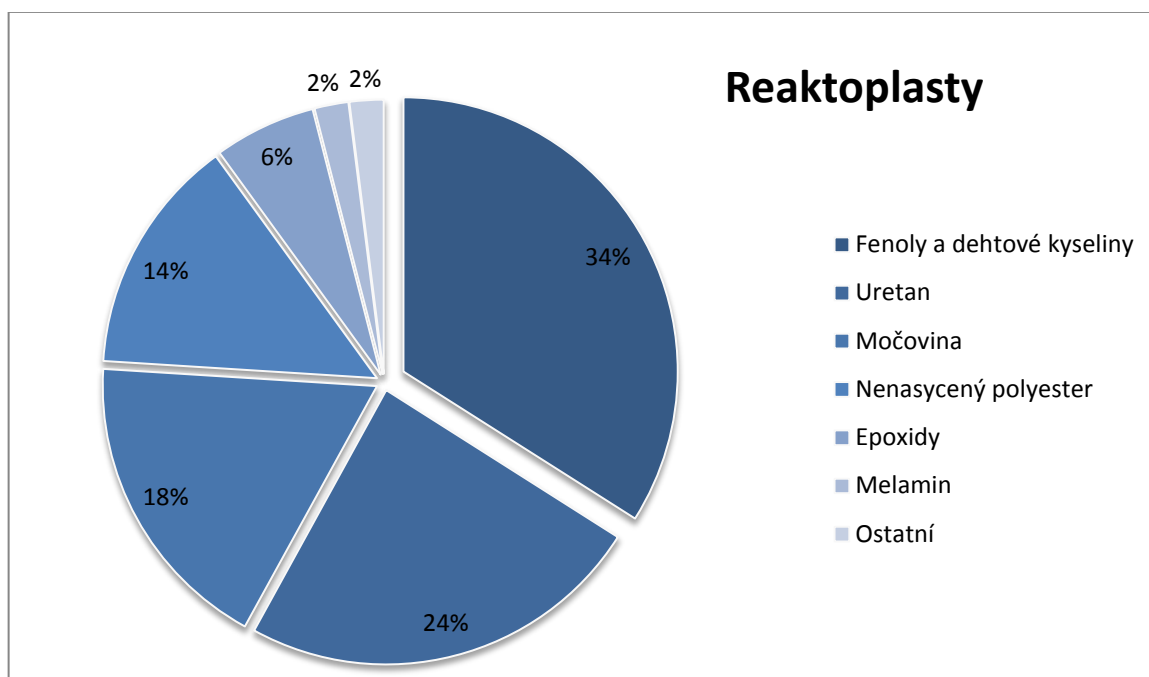
Plasty rozlišujeme na dvě hlavní skupiny reaktoplasy a termoplasy. Termoplasy jsou charakteristické tuhnutím, když tuhnou při nízkých teplotách je omezen pohyb dlouhých molekul. V případě opětovného zahřátí jsou tyto materiály na rozdíl od reaktoplastů opět tvarovatelné. Termoplasy se dají dále rozdělit na semi-krytalické a amorfnní polymery. (Osswald, 1998)



Obr. 1. Rozdělení polymerů



Graf 1. Členění polymerní produkce v USA.



Graf 2. Členění polymerní produkce v USA.

Amorfní termoplasty obsahují molekuly, které zůstávají neuspořádané, dokud nedojde ke ztuhnutí. To vede k materiálu s náhodnou molekulární strukturou. Amorfní polymer tuhne nebo skelnatí jakmile se ochladí pod teplotu skelného přechodu  $T_g$ . Semi-krystalické termoplasty naopak tuhnou v určitém pořadí jejich molekulární struktury. Při chladnutí dochází k vytvrzení, kdy se molekuly uspořádávají v pravidelném pořadí níže, což se obvykle nazývá teplota tání  $T_m$ . Molekuly v semi-krystalických polymerech, nejsou schopny setrvat v amorfních oblastech. Tyto oblasti v semi-krystalických polymerech tuhnou při teplotě skelného přechodu. Většina semi-krystalických polymerů má teplotu skelného přechodu pod hranicí  $0^\circ\text{C}$  a v pokojové teplotě se chovají jako guma. V tabulce 1 nalezneme nejčastější amorfní, semi-krystalické i elastomerní materiály společně s jejich možnými aplikacemi. (Osswald, 1998)

Polymery reaktoplastů se vytvrzují pomocí chemických přísad. Dlouhé makromolekuly se kříží během vytvrzování a dochází ke vzniku sítě. Původní molekuly se již nemohou v této síti dále pohybovat. Tyto sítě zabraňují „toku“ dokonce i přes opětovné zahřátí materiálu. Vysoká hustota zesíťování mezi molekulami dělá reaktoplasty tuhými a křehkými zároveň. Reaktoplasty občas vykazují teploty skelného přechodu, které překračují teploty tepelné degradace. (Osswald, 1998)

Elastomery jsou v porovnání s reaktoplasty méně zesíťované a tím umožňují téměř úplné molekulární prodloužení. Zesíťované molekuly a spojení mezi nimi způsobuje, že i velké deformace jsou vratné. Typickou vlastností elastomeru je nízká teplota skelného přechodu, která je nižší než teplota pokojová. (Osswald, 1998)

Tab. 1. Nejčastější polymery a jejich použití.

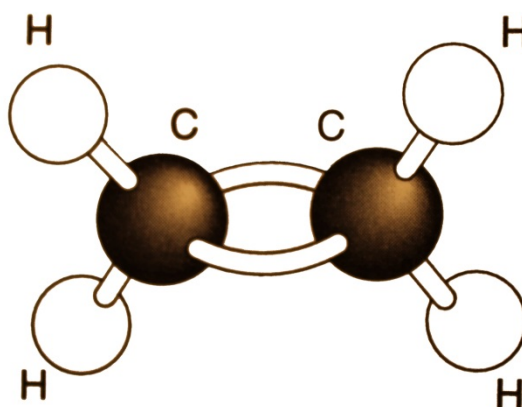
<b>Polymery</b>	<b>Aplikace</b>
<b>TERMOPLASTICKÉ POLYMERY AMORFNÍ</b>	
PS	Transparentní výrobky, obaly
PMMA	okna letadel, čočky, brzdová světla
PC	Přilby, hokejové hledí, světlomety
Neměkčené PVC	Trubky, profily oken, nádoby, obaly
Měkčené PVC	Boty, hadice, podlahoviny
<b>TERMOPLASTICKÉ POLYMERY SEMI-KRYSTALICKÉ</b>	
HDPE	Lahve na mléko, domácí potřeby
LDPE	Hromadně vyráběné domácí potřeby, potravinové obaly
PP	Kryt autobaterie, skříně elektro instalce
PTFE	Povlak pánví, povlak na ložiska
PA	Ozubené kola, šrouby, trubky, vlasec
<b>REAKTOPLASTY</b>	
EPOXYDY	Lepidla,
MELAMIN	Dekoratивní teplu odolné plochy nábytku
FENOLY	Teplu odolné úchytky (pánve, hrnce)
NENASYCENÝ PES	Dřezy a vany, automobilové díly (nárazníky)

Existují tisíce druhů polymerů, které lze nadále kombinovat a vyvíjet. Tyto polymery se poté vyznačují širokou škálou vlastností jako tvrdost, houževnatost, tvárnost, křehkost a spoustu dalších vlastností. Makromolekulární struktura určuje rozmezí důležitých vlastností vybraných polymerů. Relativně nízká tuhost polymerních materiálů je způsobena jejich molekulární strukturou, která dovoluje pohyb i pod relativně velkým napětím. Nicméně pevnost a tuhost jednotlivých polymerních řetězců je mnohem vyšší než v zjištěných vlastnostech celkové struktury. Příkladem může být polyethlen, jehož molekuly mají teoretickou tuhost 300 000 MPa, ale celková tuhost se pohybuje kolem 1000 MPa. (Osswald, 1998)

### 1.1.1 Makromolekulární struktura polymerů

Polymery jsou makromolekulární struktury, vytvářené synteticky nebo pomocí přirozených procesů. Bavlna, hedvábí, přírodní kaučuk. Slonovina, jantar a dřevo, to je několik materiálů, které se vyskytují přirozeně s organickou makromolekulární strukturou, zatímco přirozené anorganické materiály obsahují křemen a sklo. Ostatní třídy organických materiálů s makromolekulární strukturou jsou syntetické polymery, které jsou vytvářeny pomocí adiční polymerace nebo kondenzační polymerace. (Osswald, 1998)

Adiční polymerace, kde jsou monomery přidávány jeden k druhému rozbitím dvojně vazby existující mezi atomy uhlíku, umožňuje spojit sousední atomy uhlíku a vytvářet tak dlouhé řetězce. Nejjednodušší příklad přidávání monomerů ethylenu je schematicky znázorněn na obr. 3, vytvoření molekul polyethylenu je na obr. 4. Schématické zobrazení na obr. 4 lze rovněž zapsat symbolicky, jak je znázorněno na obr. 5. Zde index  $n$  představuje počet opakovaných jednotek, které stanovují molekulovou hmotnost polymeru. Počet opakovaných jednotek se obvykle označuje jako stupeň polymerace. (Osswald, 1998)

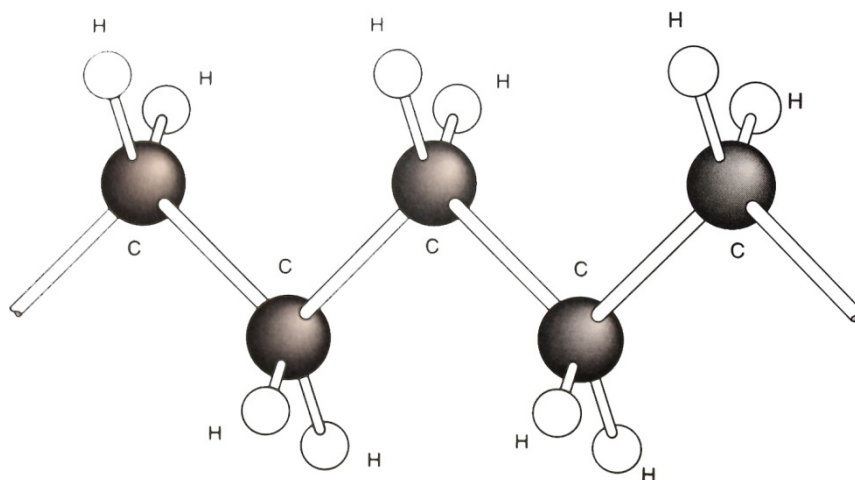


Obr. 2. Monomer ethylenu

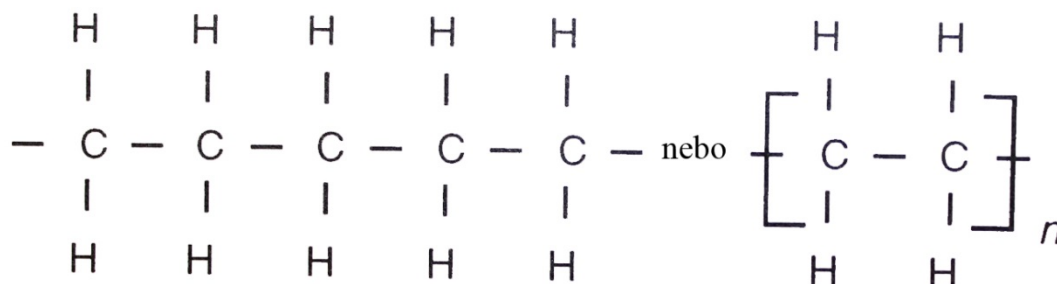
Zdroj: Osswald, 1998, str.8)

Další technikou pro výrobu makromolekulárních materiálů je kondenzační polymerace. Kondenzační polymerace nastane, když se smíchají dva prvky s koncovými skupinami, které reagují jedna s druhou. Pokud jsou stoichiometrické, tyto koncové skupiny reagují, spojují se do řetězců a ponechávají vedlejší produkt jako je voda. Běžný polymer vyrobený kondenzační polymerací je polyamid, kde diaminové a diacidové skupiny reagují do vzniku polyamidu a vody, jak je znázorněno na obr. 6. (Osswald, 1998)

Na molekulové úrovni je několik sil, které drží polymerické materiály pohromadě. K základním silám patří kovalentní vazby, které drží polymerní kostru pohromadě, jako je vazba  $-C-C-$  nebo  $-C-N-$ . (Osswald, 1998)

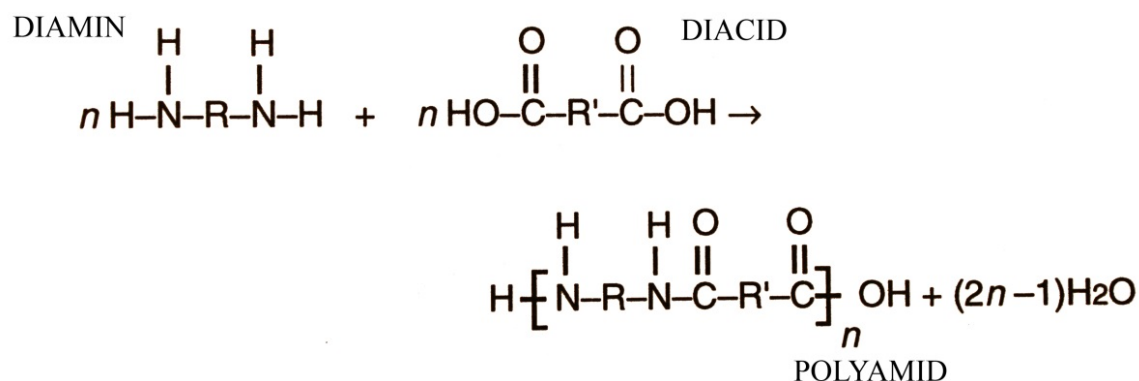


Obr. 3. Molekula polyethylenu



Obr. 4. Symbolické zobrazení molekuly polyethylenu

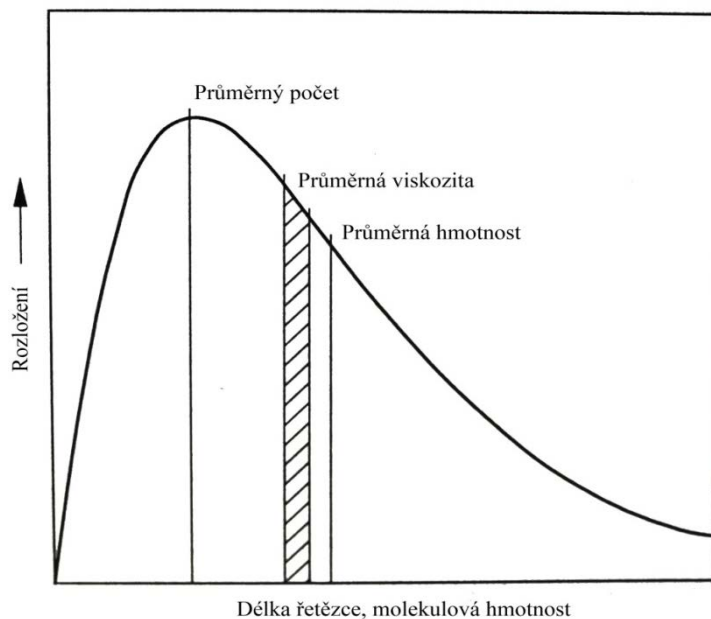




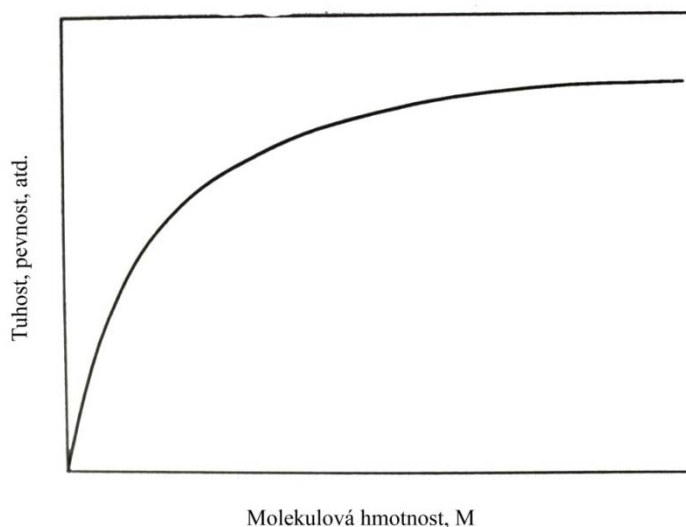
Obr. 5. Symbolické zobrazení kondenzační polymerace polyamidu

### 1.1.2 Molekulová hmotnost

Polymerické materiály se obvykle skládají z polymerových řetězců o různých délkách. S výjimkou některých přirozeně se vyskytujících polymerů má většina polymerů rozložení molekulové hmotnosti dle Obr. 6. A molekulová hmotnost je popisovaná jako sada průměrů. Vlastnosti polymerických materiálů úzce souvisí s molekulovou hmotností polymeru, jak je schematicky zobrazeno na obr. 7. Polymer, jako polystyren je tuhý a křehký při pokojové teplotě se stupněm polymerace 1,000. Avšak na stupni polymerace 10 je při pokojové teplotě PS lepkavý a měkký. Vlastnosti tuhosti dosahují asymptotického maxima, zatímco teplota tečení se zvyšuje s molekulovou hmotností. Je třeba nalézt takovou molekulovou hmotnost polymeru, která vykazuje ideální mechanické vlastnosti, zatímco jsou dodržovány vlastnosti tečení, které usnadní tvarování materiálu během výroby. (Osswald, 1998)



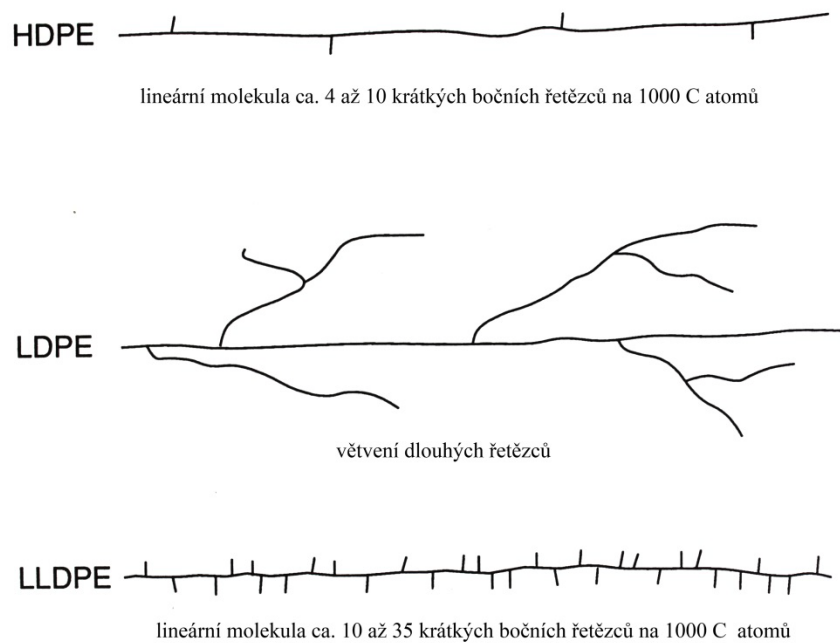
Obr. 6. Rozložení molekulové hmotnosti u běžného termoplastu



Obr. 7. Vliv molekulové hmotnosti na mech. vlastnostech

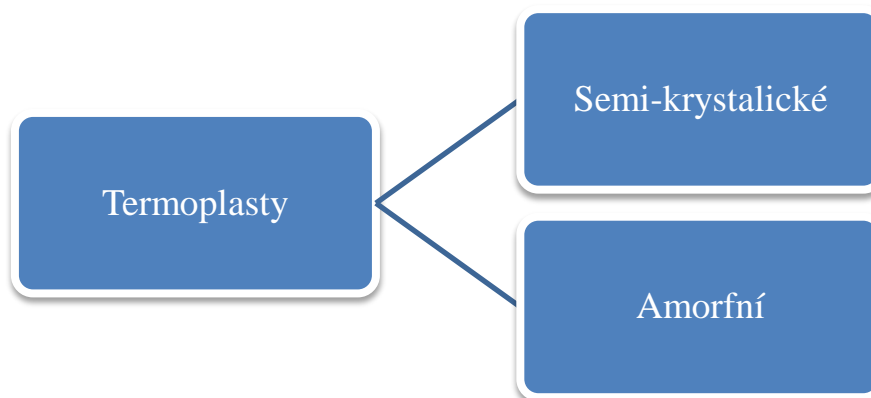
Větvení polymerového řetězce, které vzniká vlivem nesouměrnosti během polymerace, také ovlivňuje finální strukturu, krystalitu a vlastnosti polymerického materiálu. Obr.8 znázorňuje molekulární strukturu vysokohustotního polyethylenu(HDPE), nízko-hustotního polyethylenu(LDPE) a lineární nízko-hustotního polyethylenu (LLDPE). Vysokohustotní polyethylen(HDPE) má 5 až 10 krátkých větví každých 1000 atomů uhlíku. Polymerové

řetězce s několika krátkými větvemi mohou krystalizovat snadněji, což vede k vyšší hustotě. (Osswald, 1998)



Obr. 8. Schéma molekulové struktury různých polyethylenů

## 1.2 Termoplasty a rozdělení



Obr. 9. Schéma rozdělení termoplastů

### 1.2.1 Uspořádání molekul polymeru

Polymerní materiály se dělí buď na termoplasty nebo na reaktoplasty. Termoplasty se mohou po tuhnutí dále tepelně zpracovat, ale reaktoplasty tuhnou pomocí chemické reakce, která má za následek, že molekuly polymeru mají příčnou vazbu. Tyto materiály s příčnou vazbou nelze po vytuhnutí dále zpracovávat. (Osswald, 1998)

Termoplasty při tuhnutí získávají dvě různé struktury: amorfní a semi-krytalickou. Amorfní polymery jsou ty, kde molekuly ztuhnou do nahodilého uspořádání, zatímco molekuly semi-krytalických polymerů se vyrovnají do společné osy se svými sousedy, vytvářejí oblasti s trojrozměrným uspořádáním. (Osswald, 1998)

### 1.2.2 Termoplastické polymery

Tvorba makromolekul z monomerů nastane, pokud tam jsou nenasycené atomy uhlíku (atomy uhlíku spojené s dvojitou nebo trojitou vazbou) nebo pokud tam jsou monomery s koncovými skupinami. Například v monomeru ethylenu je rozštěpena dvojitá vazba, což uvolní dva valenční elektrony na monomer a vede to ke vzniku makromolekuly polyethylenu. Tento proces se nazývá polymerace. Podobně, dva doplňující se polymery ( $R$  a  $R'$ ), z nichž každý vlastní dvě reaktivní koncové skupiny (dvoj-funkční), mohou reagovat jeden s druhým, což také vede ke vzniku polymerového řetězce. (Osswald, 1998)

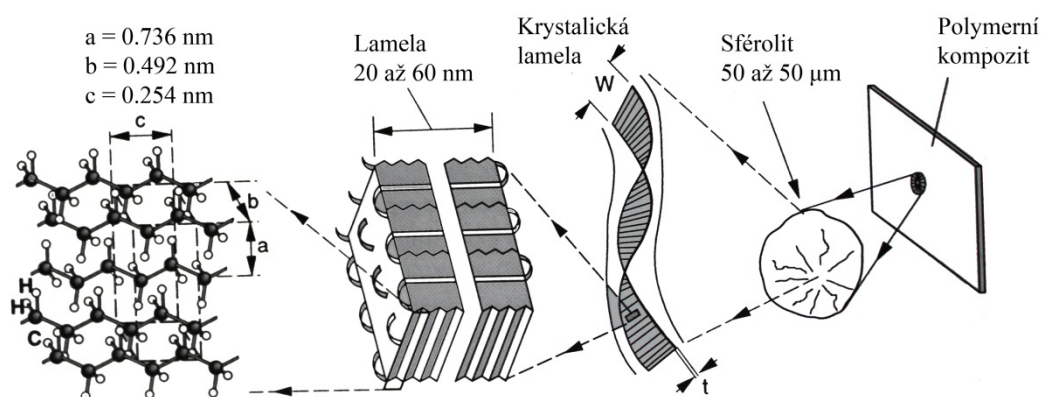
### 1.2.3 Amorfní termoplasty

Amorfní termoplasty s jejich nahodilým uspořádáním molekulární struktury jsou podobné špagetám. Pokud jde o jejich strukturu, charakteristická velikost největšího vzniku oblasti je délka vazby uhlík-uhlík. Tento rozměr je mnohem menší než vlnová délka viditelného světla, což obecně činí termoplasty velmi jasnými a ve většině případů skoro průhlednými.

Na obr. 9 je modul pružnosti ve smyku,  $G'$ , v závislosti na teplotě polystyrenu, jednoho z nejběžnějších amorfních termoplastů. Obrázek, který vznikl na základě dynamicko-mechanického testu, ukazuje dvě obecné oblasti: jednu, kde se modul jeví docela konstantní a druhou, kde modul se stoupající teplotou významně klesá. Při snižování teplot materiál vstupuje do sklovité oblasti, kde sklon modulu dosahuje nuly. Při vysokých teplotách je modul zanedbatelný a materiál je dostatečně měkký, aby mohl téci. Přestože zde není jasný přechod mezi stavem „pevným“ a „kapalným“, teplota dělicí dva stavy v amorfním termoplastu se nazývá teplota skleněného přechodu  $T_g$ . U termoplastu na obr. 9 je teplota skleněného přechodu kolem  $110^\circ\text{C}$ . Přestože se data obvykle znázorňují ve formě uvedené na obr. 9., byla křivka znázorněna na obrázku měřena při konstantní frekvenci. Pokud se zkušební frekvence zvýší - sníží časovou osu-křivka se posune doprava, protože vyšší teploty jsou požadovány k dosažení molekulárního pohybu při nové frekvenci. (Osswald, 1998)

### 1.2.4 Semi-krystalické termoplasty

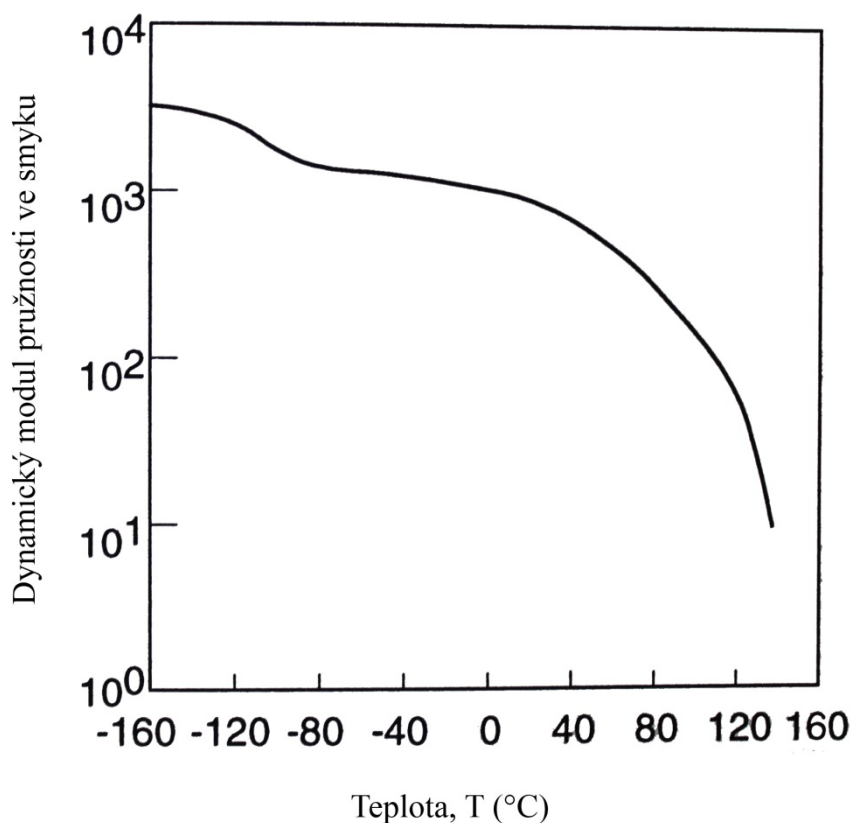
Molekuly v Semi-krystalických termoplastických polymerech jsou srovnány v uspořádané krystalické struktuře na Obr. 10. Schéma zobrazuje obecnou strukturu a hierarchické uspořádání v Semi-krystalických materiálech. Krystalická struktura je částí laminárního krystalu, který následně vytváří sférolity. Sférolitická struktura je největší oblast se specifickým uspořádáním a má charakteristickou velikost 50 až  $500\ \mu\text{m}$  to je mnohem větší než vlnová délka viditelného světla, což činí semi-krystalické materiály průsvitné, ne průhledné. (Osswald, 1998)



Obr. 10. Schéma molekulové struktury a uspořádání typ. polykrystalických materiálů.

Krystalické oblasti jsou však drobné s molekulárními řetězci procházejícími jak krystalickými, tak amorfními oblastmi. Stupeň krystalizace v běžném termoplastu např. u PE závisí na větvení a rychlosti chlazení. LDPE se svými dlouhými větvemi obr. 1.10 může krystalizovat pouze kolem 40 až 50 %, zatímco HDPE krystalizuje až do 80%. Hustota a pevnost polykrystalických termoplastů stoupá se stupněm krystalizace. (Osswald, 1998)

Na obr. 1.13 je dynamický modul pružnosti ve smyku v závislosti na teplotě u HDPE, jednoho z nejběžnějších polykrystalických termoplastů. Tato křivka opět zobrazuje data měřená při jedné zkušební frekvenci. Obrázek jasně ukazuje dva zřetelné přechody: jeden při  $-110^{\circ}\text{C}$ , tzv. teplota skelného přechodu a další kolem  $140^{\circ}\text{C}$ , tzv. teplota tání. Nad teplotou tání je modul pružnosti ve smyku zanedbatelný a materiál teče. Krystalické uspořádání se začíná rozvíjet, jakmile teplota klesne pod bod tání. Mezi teplotou tavení a teplotou skelného přechodu se materiál chová jako kůže. Jakmile teplota klesne pod teploty skelného přechodu, amorfní oblasti uvnitř semi-krystalické struktury ztuhnou a vytvoří sklovitý, ztuhlý a někdy křehký polymer. (Osswald, 1998)



Obr. 11. Modul pružnosti ve smyku HDPE v závislosti na teplotě

### 1.3 Polymerové přísady

Polymery se málokdy prodávají jako čistý materiál. Častěji se stává, že polymery obsahují několik přísad, které pomáhají během zpracování, barvení nebo zlepšování mechanických vlastností. (Osswald, 1998)

#### 1.3.1 Změkčovadla

Rozpouštědla, obvykle nazývána změkčovadla, se někdy přimíchávají do polymeru, aby významně změnila jeho reologické nebo mechanické vlastnosti. Změkčovadla se používají jako pomocné prostředky při zpracování, protože mají stejný účinek jako je zvyšování teploty materiálu. Výsledná snížená viskozita snižuje riziko tepelné degradace během zpracování. Např. nitrit celulosy tepelně degraduje, je-li zpracováván bez změkčovadla. Změkčovadla se častěji používají ke změně mechanických vlastností polymeru, jako je tuhost, tvrdost a pevnost. Například přidáním změkčovadla jako je dioctylftalát (DOP) do PVC se může snížit jeho tuhost o tři řády veličiny a může se snížit jeho teplota skleněného přecho-

du o 35°C. Vysoce měkčení PVC je ve skutečnosti pryž při pokojové teplotě. (Osswald, 1998)

### 1.3.2 Přísady zpomalující hoření

Vzhledem k tomu, že polymery jsou organické materiály, je většina z nich hořlavá. Hořlavost polymerů byla vždy vážným technickým problémem. Avšak některé přísady, které obsahují halogeny, jako je **bromin** nebo **chlorin** nebo fosfor, snižují možnost zapálení uvnitř polymerové částice nebo došlo-li již ke vznícení, snižují šíření plamene. **Bromin** je účinnější přísada zpomalující hoření než **chlorin**. (Osswald, 1998)

### 1.3.3 Stabilizátory

Kombinace tepla a kyslíku může vést k tepelné degradaci v polymeru. Teplo nebo energie produkuje volné radikály, které reagují s kyslíkem a vytvářejí karbonylové sloučeniny, což vede k vyblednutí žluté nebo hnědé barvy u finálního produktu.

Teplotní degradace může být potlačena přidáním stabilizátorů, jako jsou antioxidanty nebo rozpouštědla (dekompozery). Tyto přísady neeliminují teplotní degradaci, ale zpomalují ji. Jakmile byl stabilizátor spotřebován reakcí s kyslíkem, polymer již není nadále chráněn proti teplotní degradaci. Polyvinylchlorid (PVC) je zřejmě nejzranitelnější polymer, pokud jde o teplotní degradaci. U PVC nastane roztržení vazby C-Cl v nejslabším bodě molekuly. Radikály chloridu reagují s jejich nejbližší skupinou CH, vznikne HCl a vytvoří nové slabé vazby C-Cl. Proto je nutné použít stabilizátor k neutralizaci HCl a zastavení autokatalytické reakce a stejně tak jako prevenci koroze zpracovávaného zařízení. (Osswald, 1998)

### 1.3.4 Antistatická činidla

Vzhledem k tomu, že polymery mají nízkou elektrickou vodivost, mohou snadno tvořit elektrické náboje. Množství vytvořených nábojů je regulováno rychlostí, při které se náboj generuje ve srovnání s rozkladem náboje. Rychlost generování náboje na povrchu částice lze snížit snížením intimity kontaktu, zatímco rychlost rozkladu náboje se zvyšuje skrze vodivost povrchu. A proto, by dobré antistatické činidlo mělo být ionizační přísadou, která možní náboji migrovat na povrch. Ve stejném čase by mělo vytvářet mosty k ovzduší skrze vlhkost v okolí. Typickým antistatickým činidlem jsou dusíkové směsi, jako aminy s dlouhými řetězci a amidy a polyhydrikové alkoholy. (Osswald, 1998)



### 1.3.5 Plniva

Plniva lze rozčlenit třemi způsoby:

1. Zpevňující polymer a zlepšující jeho mechanický výkon
2. Používají se k vyplnění místa a tím ke snížení množství práce materiálu, který vytváří částice, někdy se nazývají extendery (nastavovací plnidla)
3. Rozptylování skrze polymer, aby došlo ke zlepšení jeho elektrické vodivosti.

Kompozity lze dále dělit na kompozity s posilovačem o vysokém výkonu a kompozity s posilovačem o nízkém výkonu. Kompozity o vysokém výkonu jsou ty, u kterých je posilovač umístěn uvnitř polymeru, takže je dosaženo optimálního mechanického chování, jako např. jednosměrná skleněná vlákna v epoxidové pryskyřici. Kompozity o vysokém výkonu obvykle mají 50 až 80 % posilovačů podle objemu a obvykle mají vrstvený trubcový tvar obsahují spletené posilovače. Kompozity o nízkém výkonu jsou ty, u kterých je posilovač dostatečně malý, aby mohl být rozptylován do lisovnice. Tyto materiály lze zpracovávat stejně jako jejich nezpevněné ekvivalenty.

Nejobvyklejším plnivem, které se používá ke zpevnění polymerických materiálů je skleněné vlákno. Avšak dřevěné vlákno, které se běžně používá jako nastavovací plnidlo (extender), také zvyšuje tuhost a mechanický výkon některých termoplastů. (Osswald, 1998)

## 1.4 Reaktoplasty

Jsou to polymerní materiály, dříve nazývané termosety, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tak tvářet, ale jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci, prostorovému zesíťování struktury tzv. vytvrzování. Výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu. Ochlazování reaktoplastů probíhá mimo nástroj, důvodem je problematika rychlého ohřevu a následně rychlého ochlazení materiálu. Tento proces je nevratný a opětovným roztavením, rozpuštěním nebo zahříváním by došlo k rozkladu hmoty tzv. degradaci vytvrzeného plastu. Tato problematika se týká epoxidové pryskyřice, polyesterové hmoty apod.

(zdroj [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/sekce\\_plasty/01.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm))

## 1.5 Plastický stav termoplastů

Plastický stav odpovídá možnostem změn vzájemných poloh celých makromolekul vlivem vnějších sil. Proces tečení polymerů je tedy třeba chápat jako nevratnou změnu polohy makromolekul navzájem. Makromolekuly se přesouvají po částech přeskokem segmentů z jedné polohy do druhé. Od velikostí se přemísťující se částice (segmentu makromolekuly) závisí aktivační energie viskózního toku polymeru. Z blízkosti aktivační energie viskózního toku nízkomolekulárních kapalin a polymerů vyplývá, že velikost pohybujících se částic je podobná, nevyplývá však z toho fakt, že jsou blízké hodnoty viskozity.

Makro viskozita polymerního systému je mírou odporu k přemístění celých makromolekul (tečení) a odráží jen nepřímo omezenost či volnost pohybu segmentů makromolekuly. Se zvětšováním délky řetězce se zvětšuje totiž pravděpodobnost takových přeskoků, které se vzájemně kompenzují, takže makromolekula jako celek se pomaleji přemísťuje. Takovému to přemísťování makromolekul kromě toho zabraňuje jejich vzájemné přeskupení polymerních klubíček. Viskozita tavenin polymeru je tudíž velmi vysoká.

Viskozita polymerů v plastickém stavu je velmi závislá na teplotě a jejich molekulové hmotnosti. V závislosti na teplotě a molekulové hmotnosti je viskozita v rozmezí  $10^3$  až  $10^8 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ . V nižší oblasti molekulových hmotností viskozita taveniny v závislosti na molekulové hmotnosti se zvětšuje s exponentem 1,5 až 2 pokud se při větších molekulových hmotnostech se zvýší exponent na hodnotu až 3,5. Se zvyšováním exponentu souvisí možnost fyzikálního zapletení makromolekul, což se projeví jako efektivní zvětšení molekulové hmotnosti.

Při teplotě  $T_g + 100^\circ\text{C}$  poklesne viskozita taveniny až o 12 řádů v porovnání s viskozitou polymerů pod teplotou  $T_g$ . V blízkosti teploty tuhnutí Arrheniuv vztah pro změnu viskozity neplatí a zdánlivá aktivační energie vyhodnocena z malých teplotních rozdílů dosahuje neobyčejně velké hodnoty. Tady již nezáleží přeskok segmentů od dosažení energie potřebné na přemístění segmentů do volné mezery. Ale i od volného prostoru, který umožní přemístění segmentu. Čím více se přibližujeme teploty skelného přechodu, tím je volný objem menší, a proto musím víc segmentů různých makromolekul koordinovat svůj pohyb, aby se mohly přemístit do volného objemu a obnovujícího se volného objemu.

Důležitý je fakt, že viskozita je dominantní vlastností pro zpracovatelské technologie. Pro hmotu kapalného polymeru s vysokou viskozitou jsou potřebné na tok ve zpracovatelském

zařízení vyšší tlaky. Základní jednoduchou metodou na hodnocení zpracovatelností polymeru je obvykle jejich charakteristika použitím indexů toku taveniny což je v podstatě množství materiálu protečeného přes standartní kapiláru.

Při zkoumání tokových vlastností tavenin polymerů se zjistilo, že v oblasti vyšších napětí se tok neřídí Newtonovým zákonem, což znamená, že viskozita není materiálovou konstantou, ale i funkcí použitého napětí (při malých smykových napětích Newtonův zákon platí). Taveniny polymerů tak zařazujeme mezi neneutonské kapaliny. Většinou se projevují jako pseudoplastické: Smyková rychlost se smykovým napětím se zvyšuje víc než proporcionálně, tudíž viskozita se smykovým napětím resp. se smykovou rychlostí klesá.

## 2 REOLOGIE

### 2.1 Všeobecná charakteristika

Reologie je věda o chování tekutin a jejich deformaci při proudění. Mezi velkým množstvím materiálu byly polymery shledány reologickými studiiemi jako nejvíce zajímavé a komplexní materiály. U polymerních tavenin je smykové chování (tokové vlastnosti- smyková viskozita), velmi závislé na teplotě. (Brydson, 1970)

Základní úlohou reologie je měření, hodnocení a vysvětlení materiálového chování hmoty při působení vnějších sil. Reologie zkoumá deformaci, která je charakterizovaná nevratným charakterem, jinými slovy tečením materiálu. Velký význam má reologie hlavně při zpracování plastů. Tok tavenin plastů, který se vyznačuje neneutronovskými tokovými vlastnostmi, je možné považovat za jednu část v oblasti reologie. Předmětem reologie tavenin plastů je charakterizovat viskozitu a tokové vlastnosti při zpracovatelských teplotách. (Brydson, 1970)

### 2.2 Základní definice

Před tím, než se začneme věnovat detailům tokového chování tavenin polymerů, je vhodné blíže definovat některé základy terminologie používané při popisu toku kapalin.

**Tlakový tok:** *Tok vyvolaný přítomností tlakového gradientu v kapalině, jinými slovy, lokálními změnami tlaku.*

Jedním z nejrozšířenějších příkladů tlakového toku je tok vody, který vzniká při otočení vodovodního kohoutku. Tento tok se vytvoří, protože tlak v potrubí je vyšší jako tlak na výstupu z kohoutku. V tomto případě nepozorujeme relativní pohyb rozhraní kapaliny (stěna potrubí), neboť jde o čistý tlakový tok. Ve většině trysek pro vytlačování je tok přes trysku čistým tlakovým tokem. Tok taveniny polymeru v trysce je výsledkem faktu, že tlak na vstupu do trysky je vyšší než tlak na výstupu z trysky. Rychlost toku v trysce je určena tlakem na vstupu do trysky, který se často nazývá i jako tlak před tryskou (tryskový tlak). (Brydson, 1970)

**Smyk:** *Druh deformace, při které se vyskytují rozdíly rychlosti v kolmém směru na směr toku.*

Kapalina teče smykovým tokem, když se v ní vyskytují rozdíly rychlosti ve směru normály (kolmo na směr toku). Smykový tok je možné vysvětlit jako pohyb materiálu mezi dvěma rovnoběžnými deskami, z kterých je jedna spodní, pevná, nepohyblivá. Jak na druhou, vrchní desku působíme silou  $F$  – materiál mezi těmito deskami se začne pohybovat – vznikne smykový tok. Mezi deskami vznikne rychlostní gradient, kapalina se začne pohybovat ve směru působení vnější síly. (Brydson, 1970)

**Prodloužení:** *Druh deformace, při kterém se vyskytují rozdíly v směru toku.*

Kapalina se deformuje prodloužením, když se mění rychlost toku ve směru toku. S prodloužováním taveniny plastu se můžeme setkat např. při vyfukování folií a výrobě vláken. Vlastnosti tavenin plastů při prodloužování souvisí s elastickým charakterem těchto tavenin jako nenewtonovských kapalin. (Brydson, 1970)

**Smyková rychlost ( $\dot{\gamma}$ )** *Rozdíly v rychlosti na jednotku normálový vzdálenosti (kolmé na směr toku).*

Rychlost smyku, neboli smyková rychlost, je jeden z nejdůležitějších parametrů zpracování polymerních tavenin. Když se proces zpracování popisuje kvantitativně, je potřeba zjistit smykovou rychlost v každém místě taveniny. Smyková rychlost se všeobecně píše řeckým písmem  $\dot{\gamma}$  index  $\cdot$  označuje derivaci podle souřadnice  $\dot{\gamma} = d\gamma/dt$  Smykovou rychlost můžeme napsat jednoduše následujícím způsobem:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv(xy)}{dy} \quad (1)$$

Z rovnice můžeme vidět, že lokální smyková rychlost je ekvivalentní lokálnímu gradientu rychlostního profilu. Po zjištění rychlostního profilu, dokážeme určit smykovou rychlost v každé pozici. Podle definice je smyková rychlost změnou lineární rychlosti na jednotku délky, ale ve skutečnosti je jednotka složitější. V podstatě to je  $\frac{m}{m}$ . Zjednodušením uvedeného výrazu se dostaneme k používané jednotce  $s^{-1}$ . V praxi je smyková rychlost při zpracování plastů při různé technologii různá, rozdíly jsou až řádové:

Válcování  $10 - 100 s^{-1}$

Vytlačování  $100 - 1000 s^{-1}$

Vstříkování  $1000 - 10\,000 s^{-1}$

**Smyková deformace  $\gamma$ :** *Posunutí ( ve směru toku) na jednotku normálové vzdálenosti za určitý časový úsek. (Brydson,1970)*

Smyková deformace  $\gamma$  se všeobecně píše řeckým písmenem  $\gamma$ , v tomto případě bez tečky nebo indexu \*. Souvislost mezi smykovou rychlostí a smykovou deformací je následující:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (2)$$

$$\gamma = \int \dot{\gamma} * dt \quad (3)$$

Jednotkou smykové rychlosti je  $s^{-1}$ , smyková deformace je bezrozměrné číslo. (Brydson,1970)

**Smykové napětí ( $\tau$ ):** *Napětí, které je potřebné na vytvoření smykové deformace.*

Když je kapalina namáhána ve smyku, potřebujeme určitou sílu, která způsobí tuto deformaci. Tato síla je smykové napětí, podělená plochou, na kterou působí. Smykové napětí se všeobecně píše řeckým písmenem  $\tau$ , základní jednotkou je Pa. (Brydson,1970)

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (4)$$

**Smyková viskozita ( $\eta$ ):** *Odpor materiálu vůči smykovému toku.*

Materiálová charakteristika, která poukazuje na to, jakým způsobem materiál teče – lehce či těžce, kvantitativně je smyková viskozita určena poměrem smykového napětí a smykové rychlosti:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

Smyková viskozita se všeobecně píše řeckým písmenem  $\eta$ , jednotkou viskozity je součin napětí a času – Pa.s. Jestliže chceme určit smykovou viskozitu kapaliny, je potřeba určit smykovou rychlost při určité deformaci a odpovídajícímu smykovému napětí.

Na měření viskozity tavenin termoplastů se používají speciální přístroje, které nazýváme reometr. (Brydson,1970)

**Toková křivka:** *Za tokovou křivku se všeobecně považuje závislost smykového napětí a smykové rychlosti. V případě neneutronovských kapalin za tokovou křivku označujeme i závislost smykové viskozity na smykové rychlosti, resp. napětí.*

Toková křivka se nejčastěji znázorňuje graficky, je možné i matematické vyjádření formou vhodného matematického modelu. (*Brydson, 1970*)

Pojmy jako smyková deformace, smyková rychlost, smykové napětí a smyková viskozita, jako i jejich grafické znázornění či matematické vyjádření, jsou velmi důležité pro vývoj a pochopení zpracovatelských plastikářských procesů jako je vytlačování, vstřikování atd.

**Newtonovská kapalina:** *kapalina, jejichž viskozita je nezávislá na smykové rychlosti.*

Většina nízko molekulových kapalin a plynů patří mezi newtonovské kapaliny. Závislost mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí newtonovských kapalin vykazuje lineární závislost. Newtonovské kapaliny se proto často označují jako lineární kapaliny, poměr smykového napětí a smykové rychlosti je konstantní, viskozita je při dané teplotě konstantní. (*Brydson, 1970*)

**Nenewtonská kapalina:** *kapalina, jejichž viskozita je závislá na smykové rychlosti.*

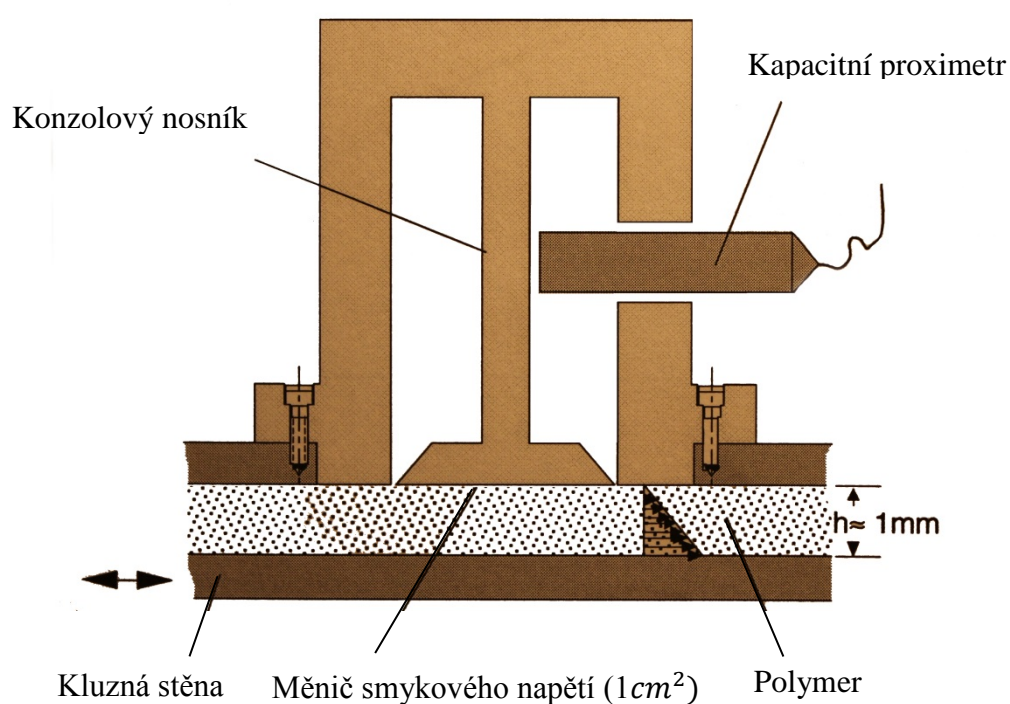
Vysoko viskozní taveniny polymerů se chovají jako nenewtonovské kapaliny, jejichž viskozita se snižuje se zvyšováním smykové rychlosti. Snižování viskozity se zvýšením smykové rychlosti se nazývá pseudoplastické chování. Závislost smykového napětí- smyková rychlost nenewtonovských kapalin je nelineární, proto se nenewtonovské kapaliny také označují jako nelineární. Další typ nenewtonovské kapaliny je diletantní kapalina. Viskozita diletantní kapaliny se s rostoucí smykovou rychlostí zvyšuje. (*Brydson, 1970*)

Reologie je tedy nauka o toku materiálů, přičemž tok hmoty považujeme za specifický typ nevratné deformace. Za deformaci všeobecně považujeme změnu vzdálenosti dvou bodů toho samého tělesa, jednou z možných deformací je i tok hmoty. Tok je deformace závislá na čase a je nevratná. Charakter toku, který je vnějším projevem relativního pohybu částic, se bude měnit podle typu zpracovaného polymeru. Pro zpracovávání polymerů je důležité zabývat se látkami tuhými i kapalnými, s důrazem na specifický charakter reologie polymerních tavenin. (*Brydson, 1970*)

Reologické vlastnosti tavenin polymerů závisí na rychlosti smykové deformace, na molekulové hmotnosti a struktury polymerů, na koncentraci různých přísad, na teplotě a na dalších faktorů. Charakter toku a deformace polymerních tavenin je důležité znát při zpracování polymeru vytlačováním, vstřikováním, vyfukováním atd. Charakter toku a deformace v průběhu spravování je rozhodující pro určení vhodných technologických podmínek zpracování a významně ovlivňuje i mechanické vlastnosti hotových výrobků. (*Brydson, 1970*)

Viskozita je nejčastěji používaným materiálovým parametrem při určování chování polymeru při zpracování. U většiny polymerních procesů je smyková rychlost dominantou. Viskozita taveniny je často měřena pomocí zařízení měřící smykové deformace. Např. jednoduchý smykový tok generovaný na kluzné stěně reometru, který můžeme vidět na schématu posuvné desky reometru smykové napětí je definováno jako:

$$\tau_{xy} = \eta(T, \dot{\gamma}) \dot{\gamma}_{xy} \quad (6)$$



Obr. 12. Schéma posuvné desky reometru

Kde  $\eta(T, \dot{\gamma})$  je viskozita a  $\dot{\gamma}$  je smyková rychlost definovaná  $v/h$ . Existují také polymerní procesy jako vyfukování, tepelné tváření a zvlákňování charakterizovány buď elongační deformací nebo kombinací smykového napětí a elongační deformace. Některé polymerní taveniny vykazují významné elastické vlivy během deformace. (Osswald, 1998)

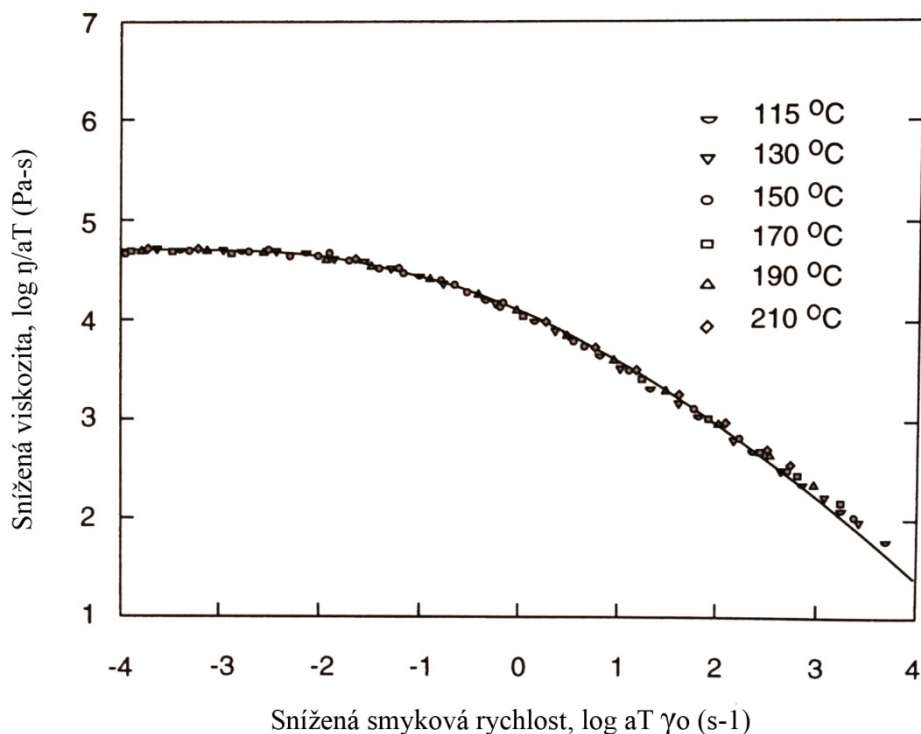


### 2.2.1 Pseudoplastické chování polymerů

Většina polymerních tavenin jsou diletantní kapaliny. Pseudoplastické (struktúrově viskózní) kapaliny charakterizuje pokles zdánlivé viskozity se zvyšováním smykové rychlosti. Pseudoplastické chování podmiňuje změna struktury protékající látky působením smykového napětí. Pokles viskozity se pozoruje v širokém rozsahu změn rychlosti smykové deformace, přičemž viskozita při vysokých hodnotách smykové rychlosti může být o několik řádů nižší než při malých hodnotách  $\dot{\gamma}$ . Takové neneutronovské chování tavenin polymerů má praktický význam i z hlediska zpracování plastů. Pokles viskozity usnadňuje zpracování roztaveného polymeru a značně snižuje celkovou energii potřebnou na udržení zpracovatelského zařízení v chodu. Podstatou neneutronovského chování pseudoplastické polymerní taveniny je orientace segmentů makromolekul v tokovém poli, která způsobuje elasticitu taveniny. Vzájemné propletení (zapleteniny) makromolekul zvyšuje možnost orientaci segmentů makromolekul v tokovém poli. (*Prentice, 1995*)

Pseudoplastický efekt je snižován viskozitou při vysokých rychlostech deformace, jak můžeme vidět z obrázku níže zobrazeného materiálu LDPE. Tento úkaz se vyskytuje také při nízké rychlosti deformace. (*Prentice, 1995*)

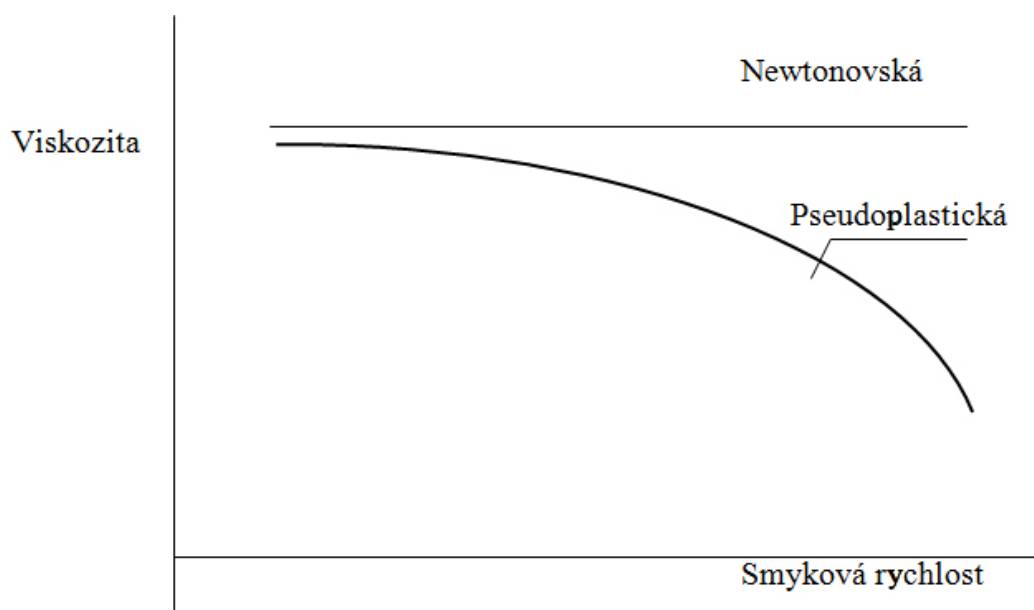
Molekuly polymerů, které jsou zapleteny, se při vysokých rychlostech deformace, či natahování molekul rozplétají. Rozpletené molekuly se tedy pohybují snadněji a snižují tak celkovou viskozitu taveniny. (*Prentice, 1995*)



Obr. 13. Snížená viskozitní křivka LDPE při 150 °C.

Taveniny polymerů řadíme na základě jejich tokového chování mezi pseudoplastické kapaliny, když jejich smyková rychlost se zvyšuje ve větší míře než lineární rychlost ve smyku, jinými slovy smyková rychlost v porovnání se smykovým napětím se zvyšuje víc. Mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí tak není konstantní proporcionalita. Výsledkem je, že smyková viskozita s růstem smykové rychlosti a smykového napětí klesá obr. 13.

Pseudoplastické chování můžeme vysvětlit mnohými způsoby, pro polymerní taveniny je ale platný jeden všeobecný princip – orientace makromolekul při toku vlivem vnějšího napětí. Asymetrické molekuly nebo jejich části jsou velmi propletené a náhodně orientované. Při namáhání ve smyku se molekuly polymerů orientují a stupeň propletení se snižuje. Orientace molekul může být naopak v disorientačním účinkem Brownova pohybu. Při velmi vysokých smykových rychlostech může být orientace úplná a v tomto rozsahu smykových rychlostí může být pozorované taktéž newtonovské chování tavenin polymerů. Některé experimentální výsledky potvrdily tuto možnost (na všeobecné tokové křivce můžeme pozorovat tzv. druhou newtonovskou oblast). (*Prentice, 1995*)



Obr. 14. Průběh viskozity pseudoplastické polymerní taveniny

Pro popsání pseudoplastických kapalin bylo navrženo vícero rovnic, některé jsou čistě empirické. Matematický model popisující neneutronovské chování kapalin by měl splňovat následující požadavky:

- Měl by mít co nejméně empirických konstant
- Konstanty by měly být lehce vyčíslitelné
- Konstanty mají mít fyzikální význam
- Model by měl zabezpečit dobrou shodu mezi experimentálními a vypočítanými hodnotami tokových veličin

Nejjednodušší model je tzv. Mocninový zákon. Všeobecný tvar mocninové rovnice je :

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (7)$$

Logaritmický tvar může zapsat i takto:

$$\log \tau = \log K + n \log \dot{\gamma} \quad (8)$$

Použitím logaritmické závislosti místo vztahu  $\tau$  místo  $\dot{\gamma}$  dosáhneme grafického vyjádření přímkové závislosti. (*Prentice, 1995*)

Mocninový zákon Ostwaldova a de Waale modelu je nejjednodušší model, který přesně představuje pseudoplastickou oblast viskozity na křivce smykové rychlosti, ale s odchylky na Newtonovském platu při snížení rychlosti deformace. Model mocninového zákona je možné zapsat ve tvaru:

$$\eta = m(T)\dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

(Rosen, 1979)

kde  $m$  je index konzistence a  $n$  index mocninného zákona. Index konzistence může zahrnovat teplotní závislost viskozity a může být :

$$m(T) = m_0 e^{-a(T-T_0)} \quad (10)$$

(Rosen, 1979)

Konstanty mocninného zákona použité ve vzorcích výše, jsou uvedeny v tabulce níže pro některé termoplasty.  $10^4$  (Rosen, 1979)

Tab. 2. Indexy mocninného zákona, pro běžné termoplasty

Polymer	$m (Pa \cdot s^n)$	$n$	$a (1/^\circ C)$	$T_0 (^\circ C)$
PS	$2.80 \times 10^4$	0.28	-0,025	170
HDPE	$2.00 \times 10^4$	0.41	-0,002	180
LDPE	$6.00 \times 10^3$	0.39	-0,013	160
PP	$7.50 \times 10^3$	0.38	-0,004	200
PVC	$1.70 \times 10^4$	0.26	-0,019	180

## 2.3 Průběh měření reologických vlastností

### 2.3.1 Kapilární reometr

Tok v kapiláře je nejčastější používanou metodou při studiu tokových vlastností polymerních tavenin, protože poskytuje výsledky při hodnotách smykových rychlostí, které se v praxi používají při jejich zpracování. (Ulbrech, 1965)

Všeobecný typ kapilárního viskozimetru na polymerní taveniny se skládá z vyhřívaného válce, který je ve spodní části spojený s menším válcem, v němž je umístěná kapilára. Jsou dvě základní varianty konstrukce kapilárního reometru:

1. Zařízení, ve kterém je píst tlačný dolů podél válce (naplněného polymerem) konstantní rychlostí a potřebným tlakem jenž obstarávají tlaková čidla.
2. Zařízení, ve kterém je tlak vyvíjený na taveninu ve vrchní části válce a měří se výtoková rychlost při daném zatížení. Zatížení pístu se může aplikovat hydraulicky nebo pneumaticky.

Měřenými veličinami jsou objemový průtok  $Q$  a tlak  $p$ . Z těchto veličin se potom vypočítává smyková rychlost, smykové napětí a smyková viskozita. (Ulbrech, 1965)

$$\tau = \frac{R \cdot p}{2 \cdot L} \quad (11)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot R^3} \quad (12)$$

Kde  $L$  je délka kapiláry,  $R$  je poloměr kapiláry. Hodnota smykové rychlosti v rovnici (12) je odvozena pro Newtonské materiály. Proto se někdy také nazývá také zdánlivá smyková rychlost. Pokud chceme vypočítat skutečnou smykovou rychlost, musíme provést tzv. Rabinowitschovu korekci, kdy se pro výpočet skutečné smykové rychlosti vezme v úvahu i směrnice tokové křivky. V tomto případě je smyková rychlost dána výrazem:

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \frac{3n+1}{4n} \quad (13)$$

kde

$$n = \frac{d \log \tau}{d \log \dot{\gamma}} \quad (14)$$

V kapilárním reometru je důležité, abychom měli spolehlivou kontrolu všech experimentálních proměnných (nejdůležitější je teplota) a aby měřené veličiny, v prvním případě tlak a v druhém případě výtoková rychlost, byly spolehlivě měřitelné. (*Ulbrech, 1965*)

Objemový průtok  $Q$  (v  $\text{cm}^3/\text{s}$ ) je množství vytlačeného materiálu přes kapiláru za časovou jednotku. Podle konstrukce přístroje můžeme objemový průtok měřit přímo anebo ho můžeme vypočítat z dobře měřitelného hmotnostního průtoku v  $\text{g/s}$ , jakmile zjistíme hustotu měřeného materiálu při teplotě měření. Jednou z možností měření objemového průtoku je nepřímé měření pomocí měření času známého objemu vytlačené taveniny. Uvedené údaje slouží na výpočet smykové rychlosti. Tlak  $p$  v jednotkách Pa resp. MPa se při reometrech vypočítává ze síly, která působí na plochu pístu, přičemž se předpokládá, že při pohybu pístu podél válce se jen zanedbatelné množství tlakové energie spotřebuje, na tření mezi pístem a válcem. Důležité je také zjistit přesný průměr kapiláry, protože vytlačené množství polymerní taveniny je mimořádně citlivé na velikost průměru kapiláry. (*Ulbrech, 1965*)

Analýza toku v kapilárních reometrech se vykonává za následujících zjednodušených předpokladech, tokový profil na obr. 15.

- Na stěně kapiláry je rychlost nulová
- Kapalina je časově nezávislá
- Tok je izometrický a laminární
- Tok podél kapiláry je ustálený a rychlost každého tokového elementu je funkcí pouze polymeru.
- Tavenina je nestlačitelná (konstantní hustota)

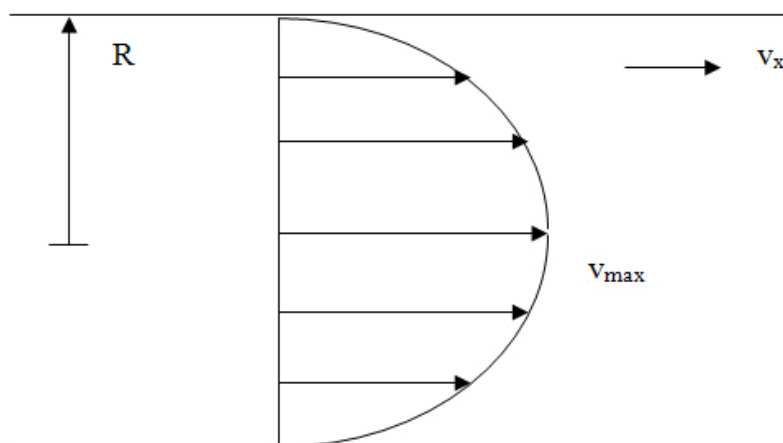
Při praktických měřeních tokových vlastností polymerních tavenin polymerů je potřebné udělat korekce na faktory, které ovlivňují průběh měření v kapiláře, tyto faktory vyplývají z neneutronovského charakteru toku. V případě polymerních tavenin mezi důležité faktory patří:

- Vstupní efekty

- Elastická absorpce energie
- Výstupní efekty
- Efekt kinetické energie

Všechny tyto efekty souvisí s viskoelastickým charakterem polymerních tavenin.

(Ulbrech, 1965)



Obr. 15. Rychlostní tokový profil v kapiláře.

Kapilární reometr poskytuje pro potřeby praxe velmi vhodné výsledky tokového chování polymerních tavenin. Grafické zobrazení tohoto chování nazýváme toková křivka, je to závislost mezi smykovou rychlostí a smykovým napětím, které se pro potřeby praxe vyjadřuje v logaritmických souřadnicích. Jednou z forem vyjádření tokové křivky je i závislost smykové viskozity na smykové rychlosti, resp. smykové napětí.

Mezi výhody kapilárního reometru patří:

- Možnost měřit v rozsahu smykových rychlostí, které se dosahuje při technologických procesech zpracování plastů
- Možnost měřit charakteristiky narůstání vytlačené struny za kapilárou
- Možnost měřit charakteristický lom taveniny
- Relativně jednoduché používání

Mezi nevýhody kapilárního reometru patří:

- Potřeba používat různých korekcí, jestliže chceme získat hodnoty skutečných tokových vlastností
- Neumožňuje přesný popis viskoelastického chování polymerních tavenin



### 3 MODELOVÁNÍ TOKU

Modelování toku tavenin plastů přináší mnohem širší pohled na chování polymerů během zpracování nebo během testů. Dovoluje nám kvantifikovat chování materiálu a získat hodnoty proměnných, které jsou důležité pro chování materiálu, ale jsou těžce měřitelné, nebo dokonce neměřitelné. Jako neměřitelné hodnoty je možno uvést složky tenzoru napětí, které určují zásadním způsobem chování materiálu. Při měření chování materiálu při testech na kapilárním reometru je neměřitelná veličina lokální teplota v kapiláře. V principu existuje způsob, jak měřit teplotu posuvným termočlánkem, ale vzhledem k malému průměru kapiláry je toto měření nemožné provést uvnitř kapiláry a při ohodnocení teplotního profilu musíme kompletně spoléhat na modelování. Naopak, při měření na kapilárním reometru je možné měřit tlak v zásobníku, který je způsoben jednak smykovým tokem v kapiláře a také elongačním tokem přechodu materiálu ze zásobníku do kapiláry. Taková, přímo měřitelná veličina nám může sloužit pro porovnání výsledků modelování s realitou a tak zjištění, zda naše předpoklady pro modelování byly správné. (Osswald, 2006),( Agasant,19991)

Pokud chceme modelovat chování polymerních tavenin při toku, musíme řešit rovnice toku, rovnici kontinuity a použít materiálový model dávající do vztahu deformaci materiálu a napětí vzniklá v materiálu.

$$\sum_{j=1}^{j=3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \eta \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

$$\eta = f \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) \quad (17)$$

Zde  $v_i$  jsou složky vektoru rychlosti,  $p$  je tlak,  $\eta$  je viskozita. Pokud chceme zahrnout i vliv teploty, musíme přidat k výše uvedeným rovnicím ještě rovnici vedení tepla.

$$\sum_{j=1}^{j=3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \sum_{j=1}^{j=3} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial x_j} v_j + D \quad (18)$$

Kde  $T$  je teplota,  $\rho$  je hustota,  $C_p$  je tepelná kapacita taveniny a  $D$  reprezentuje disipovanou energii. V případě zahrnutí teploty je závislost viskozity dána materiálovým modelem.

$$\eta = f \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j}, T \right) \quad (19)$$

Obvyklý předpoklad je, že viskózní funkce se vyjadřuje jako smyková viskozita. Pokud máme tok, kde se vyskytuje elongace materiálu, může tato viskozitní závislost zahrnovat i vliv elongačního toku. Protože v tokové doméně kapilárního reometru jsou silné elongační toky bude součástí studie prověření nakolik zahrnutí pouze smykové složky viskozity, ovlivní celkové výsledky. (*Osswald, 2006*)

### 3.1 ZPŮSOBY MODELOVÁNÍ

Modelování toku taveniny může být provedeno různými technikami v závislosti na to, jakou informaci chceme modelováním získat. Pokud chceme odhadnout, jaký tlakový spád vygeneruje daný materiál na kapiláře, a máme viskozitu materiálu popsanou mocninovým zákonem, můžeme použít dokonce analytické řešení pro jednorozměrný tok v kapiláře. Pokud je viskozita popsána složitějším modelem, např. Carreauovým modelem, pak musíme použít numerické řešení jednorozměrného toku v kapiláře. Zde je možno uplatnit metodu konečných diferencí nebo metodu konečných prvků. Tyto metody budou později popsány trochu detailněji.

Pokud nás zajímá vývoj teploty v kapiláře, musíme použít metodu konečných prvků nebo diferencí ve dvou rozměrech, ve směru toku a radiálním směru. Zde se může předpokládat, že řešení je osově symetrické a nezávisí tedy na úhlu.

Pokud bychom chtěli popsat situaci, kdy tok je závislý také na úhlu a není osově symetrický, museli bychom použít třírozměrné řešení, zase buď konečnými prvky, nebo konečnými diferencemi. Taková situace může nastat, pokud teplota kapiláry po obvodu není stejná po celém obvodu. To může být způsobeno například foukajícím vzduchem z určitého směru.

Pokud chceme postihnout materiálové chování v celém rozsahu, tedy jak v zásobníku, tak v kapiláře, musíme opět použít metodu konečných prvků nebo diferencí podobně jako v kapiláře, tedy ve směru toku a v radiálním směru, ale nyní v celém průřezu dutiny reometru. Budeme předpokládat, že systém je osově symetrický. (Osswald, 2006)

Bylo několikrát zmíněno, že k řešení se používá buď metoda konečných prvků nebo elementů. Obě metody jsou vhodné pro řešení rovnic toku, ale každá má výhody a nevýhody. Metoda konečných diferencí je v principu velmi jednoduchá. Spojité pole proměnných se nahradí sítí bodů a hodnoty dané proměnných se počítají v těchto bodech. Derivace v diferenciálních rovnicích toku se nahradí konečnými diferencemi. (Osswald, 2006)

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v_{n+1} - v_{n-1}}{2\Delta x} \quad (20)$$

Zde hodnoty  $V_{n+1}$  a  $V_{n-1}$  jsou hodnoty v bodu  $n$  sítě a  $\Delta x$  vzdálenost bodů sítě. Tímto způsobem se dá soustava diferenciálních rovnic přepsat na soustavu algebraických rovnic, které se dají při zadaných hraničních podmínkách (hodnoty proměnných v hraničních bodech) řešit. Aplikace této metody je relativně snadná, pro pravidelné pravoúhlé tvary. Pokud je ale tvar tokové domény nepravidelný, naráží metoda konečných diferencí na problém, jak popsat přesně tokovou doménu, protože uvedená metoda předpokládá, že síť je pravoúhlá. Problémy také nastanou, když má toková doména velmi neizotropní rozměry. To je případ kapiláry u reometru. Průměr kapiláry je 1mm, zatímco její délka je 20 i více mm. Pokud chceme postihnout dobře tvar rychlostního profilu, musíme mít alespoň pět dělení napříč kanálem (Osswald, 2006)

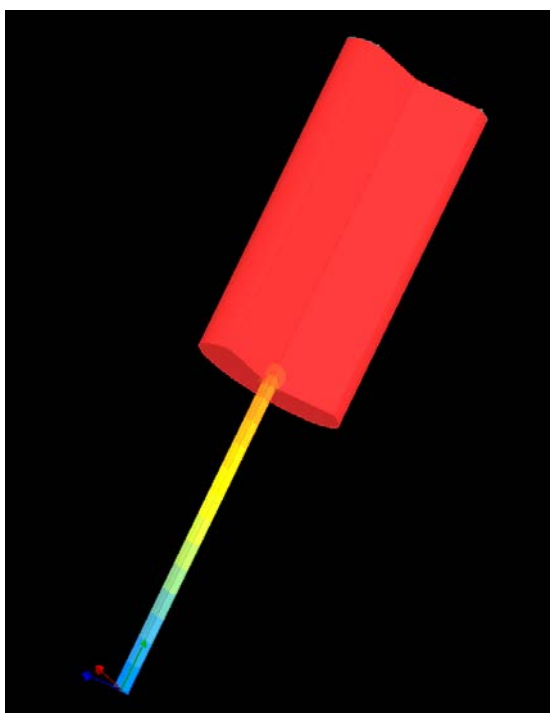
To znamená krok 0,2mm. Při tomto kroku máme 200 dělení ve směru toku. Tak mohou vznikat extrémně velké sítě a řešení jsou velmi dlouhá. Tento problém se dá obejít zavedením různého dělení v různých částech tokové domény. To ale hodně komplikuje přepis rovnic a výhoda jednoduchosti se ztrácí. Tento přístup také snižuje přesnost metody. (Osswald, 2006)

Aby se odstranily problémy s pokrytím tokové domény pro účely výpočtu, byla vyvinuta metoda konečných prvků. Ta je založena na tom, že se toková doména pokryje elementy, ve dvourozměrném případě trojúhelníky nebo obdélníky a řešení se hledá pomocí spline bazových funkcí definovaných na těchto elementech pro hodnoty zadané ve vrcholech elementů. Vede také na soustavu lineárních rovnic, které se musí řešit. Tato metoda je matematicky mnohem náročnější, ale je mnohem univerzálnější pro pokrývání tokových domén. Proto komerčně dostupné programy pro řešení laminárních tokových situací používají tuto metodu a žádný komerční program nepoužívají metodu konečných diferencí.

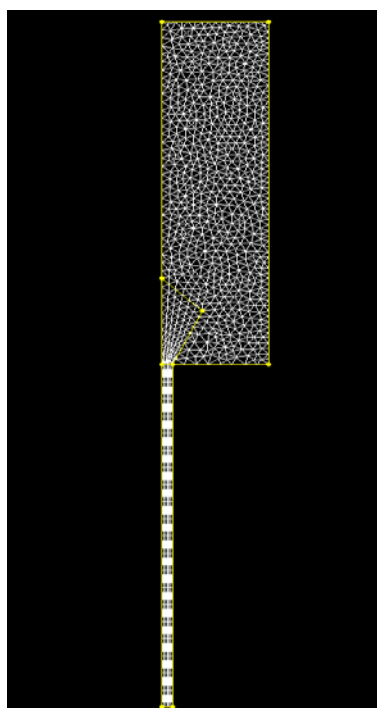
Úkolem této práce není vyvinout novou techniku pro modelování toku, ale použít existující program pro modelování toku v kapilárním reometru. Proto jsme použili software Virtual Extrusion Laboratory® modul2DFEM. (*Osswald, 2006*)

### **3.2 PROGRAM VIRTUAL EXTRUSION LABORATORY A JEJÍ MODUL 2DFEM**

Tento modul byl vyvinut firmou Compuplast® International, a.s. jako modul pro detailní studium toku polymerních tavenin v libovolné dvoudimenzionální tokové doméně. To znamená, že umožňuje řešení tokových situací, které jsou osově symetrické, což je případ kapilárního reometru. Obrázky níže ukazují v levé části typickou tokovou doménu pro modelování toku v kapilárním reometru spolu se sítí trojúhelníků vytvořenou pro modelování toku metodou konečných prvků. V pravé části je vidět 3D tvar, který je vytvořen touto tokovou doménou. (*Compuplast*)



Obr. 16. Tlakový profil modelu



Obr. 17. Zesíťovaný model

Kontury ukázané v obrázku jsou tlakový profil. Řešením je možno získat tlakový, rychlostní a teplotní profil v celé tokové doméně. Vypočtené teplotní pole a hlavně teploty na

výstupu budou indikovat nakolik je správný předpoklad izotermálnosti provedených měření. Hodnota tlaku pod pístem bude sloužit k ověření kvality vyhodnocení viskozitní křivky.

Ve 2DFEM programu je nutno zadat tvar tokové domény, hraniční podmínky a materiálové chování. Tvar tokové domény je dán použitým kapilárním reometrem a rozměry kapiláry. Hraniční podmínky jsou následující:

1. Zleva je osa symetrie. Zde se nezadá žádný další parametr.
2. Ze shora je povrch pístu. Zde se musí zadat rychlost pístu a teplota. Ta se bere také jako počáteční teplota materiálu.
3. Zprava je stěna se zadanou teplotou, což je teplota měření.
4. Zespodu je výstup materiálu z tokové domény.

Po zadání hodnot pro uvedené hranice a volbě materiálu pro modelování se modelování provede. Výsledkem je toková doména, na níž je možno vidět počítané veličiny a dále napětí, která se vytvoří během toku.

Program také umožňuje studovat hodnoty všech veličin na řetězech a podél toku.

*(Compuplast)*

## 4 CÍL PRÁCE

Cílem práce je provést uzavřený kruh při měření smykové viskozity. To znamená, změřit smykovou viskozitu na kapilárním reometru. Z měřených veličin je možno získat tokové vlastnosti. Z takto získaných tokových vlastností je možno provést modelování toku na reometru. Výsledkem modelování jsou veličiny charakterizující tok. Mezi nimi také rozložení teploty v kapiláře. Posouzení této teploty nám ukáže, jak se splněn nebo nesplněn jeden ze základních předpokladů měření a to, že teplota během měření je konstantní. Druhým výsledkem je tlak v zásobníku. Pokud použijeme reálné rozměry kapilárního reometru a materiálové vlastnosti, které získáme vyhodnocením měření na daném reometru, pak by výsledný tlak v zásobníku měl být roven měřené hodnotě. Pokud zde bude rozdíl, pak to znamená, že vyhodnocená toková křivka není správná. Cílem modelování bude tedy ověřit kvalitu měření a vyhodnocení tokové křivky.

Materiály, které budou vybrány následovně:

Jeden charakteristický materiál, který teče blízko teploty, kdy začne téci. Tím bude PVC, které bude měřeno při teplotě 190°C, materiál začíná viditelně téct při teplotě 140°C. Při teplotě měření je smyková viskozita silně závislá na teplotě a tak by se případná neizotermálnost měla promítnout na srovnání výsledného a měřeného tlaku.

Dalším materiálem bude LDPE materiál, který bude měřen při teplotě 200°C. Kde již viskozita není příliš závislá na teplotě. Na druhé straně tento materiál je silně viskoelastický a tak by se měl ukázat vliv viskoelastivity na výsledný tlak.

Posledním materiálem bude PET materiál, který se rovněž zpracovává blízko teploty tání a navíc je viskoelastický.

Všechny materiály budou měřeny na dvou tryskách,  $L/R = 20:1$  a  $L/R = 40:1$ . Na první trysce bude nižší disipace, ale relativně větší vliv elongačního toku v přechodu mezi zásobníkem a kapilárou, zatímco u druhé křivky tomu bude naopak.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**



## 5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ REOLOGICKÝCH VLASTNOSTÍ

Měření proběhlo na kapilárním reometru značky Göttfert model rheograph 2001 na technologickém parku Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.



Obr. 18 Kapilární reometr Göttfert rheograph 2001

K měření byly použity 3 druhy materiálu PVC, HDPE a PET. Všechny tyto materiály byly měřeny na 3 kapilárách o stejném průměru 1mm, ale odlišných délkách a to 10 mm, 20 mm a 30mm.

### 5.1 Postup měření

Velmi důležité bylo připravit si všechny materiály, tak aby měření s nimi bylo objektivní, tudíž bylo nezbytně nutné před samotným měřením vysušit materiál PET. Ten byl sušený 4 hodiny při teplotě 120°C. Prvním důležitým krokem bylo vyčistit reometr resp. jeho komoru od případných nečistot z předchozích měření, které by mohly negativně ovlivnit výsledky měření. Jakmile byl reometr vytemperovaný a vyčištěný, bylo možné začít první měření

na materiálu PVC při teplotě 190°C. První použitou tryskou byla tryska o délce 10mm a průměru 1 mm. Tyto trysky se instalovaly do spodní části reometru, jenž je vidět na obrázku 18.

Jako další krok bylo dávkování granulátu materiálu, v prvním případě tedy PVC. Ten se nasypal do vytemperované komory a průběžně jej bylo nutné upěchovávat, abychom co možná nejvíce odstranili zbytky vzduchu a vzduchových bublin uložených mezi právě roz-taveným granulátem. Po naplnění komory materiálem se připevnil píst na pohybový me- chanismus. Následovalo spuštění přehřevu. Po uplynutí této doby (4 min.) reometr spus- til měření dle předem nadefinovaných hodnot, jako jsou smykové rychlosti nebo pracovní teplota uvnitř komory.

Po dokončení měření bylo nezbytně nutné vyčistit komoru od zbytků PVC, vytemperovat komoru na požadovanou teplotu, vložit další trysku a postup měření opakovat.

## **5.2 MĚŘENÍ VYBRANÝCH MATERIÁLU NA KAPILÁRNÍM REOMETRU**

U daného typu kapilárního reometru bylo jednodušší začít od nejnižší teploty a tuto teplotu postupně s lišícím se materiálem zvyšovat, neboť ohřátí komory bylo časově méně nároč- né, než postupné ochlazování komory.

Proto jsem jako první měřený materiál zvolil PVC jenž jsem měřil při konstantní teplotě 190°C. Jako první typ jsem použil kapiláru o délce 10mm poté 20mm a 30mm. U všech kapilár byla doba přehřevu 4 minuty. Výsledky měření jsou shrnuty v následujících ta- bulkách.

Tab. 3 Naměřené hodnoty PVC s tryskou 10 mm na kap. reometru

Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	10	PVC	2000	144600	72,30	1,7360	57,8
2	10	PVC	1800	139700	77,62	1,5620	55,9
3	10	PVC	1500	131900	87,93	1,3020	52,8
4	10	PVC	1000	111300	111,30	0,8680	44,4
5	10	PVC	500	81090	162,10	0,4340	32,4
6	10	PVC	200	50800	254,00	0,1736	20,3
7	10	PVC	100	37120	371,20	0,0868	14,9
8	10	PVC	50	27350	547,10	0,0434	10,9
9	10	PVC	20	18560	928,10	0,01736	7,4

Tab. 4 Naměřené hodnoty PVC s tryskou 20 mm na kap. reometru

Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	20	PVC	2000	131400	65,70	1,7360	105,1
2	20	PVC	1800	127900	71,10	1,5620	102,3
3	20	PVC	1500	120600	80,44	1,3020	96,5
4	20	PVC	1000	104500	104,50	0,8680	83,6
5	20	PVC	500	79620	159,20	0,4340	63,7
6	20	PVC	200	52760	263,70	0,1736	42,2
7	20	PVC	100	38590	385,90	0,0868	30,9
8	20	PVC	50	28330	566,60	0,0434	22,7
9	20	PVC	20	18560	928,10	0,01736	14,9

Tab. 5 Naměřené hodnoty PVC s tryskou 30 mm na kap. reometru

Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	30	PVC	2000	128600	64,32	1,7360	154,3
2	30	PVC	1800	124700	69,29	1,5620	149,6
3	30	PVC	1500	117800	78,59	1,3020	141,4
4	30	PVC	1000	102900	102,90	0,8680	123,4
5	30	PVC	500	79460	158,90	0,4340	95,4
6	30	PVC	200	54060	270,30	0,1736	64,9
7	30	PVC	100	40050	400,50	0,0868	48,1
8	30	PVC	50	29630	592,70	0,0434	35,6
9	30	PVC	20	19860	993,30	0,01736	23,8

Tab. 6 Naměřené hodnoty HDPE s tryskou 10 mm na kap. reometru

Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	10	HDPE	2000	350700	175,30	1,7360	140,3
2	10	HDPE	1800	340000	188,80	1,5620	136,0
3	10	HDPE	1500	322400	214,90	1,3020	128,9
4	10	HDPE	1000	296000	296,00	0,8680	118,4
5	10	HDPE	500	249100	498,20	0,4340	99,7
6	10	HDPE	200	172900	864,60	0,1736	69,2
7	10	HDPE	100	130900	164,60	0,0868	52,4
8	10	HDPE	50	98680	1973,00	0,0434	39,5
9	10	HDPE	20	68390	3419,00	0,01736	27,4

Tab. 7 Naměřené hodnoty HDPE s tryskou 20 mm na kap. reometru

Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	20	HDPE	2000	285700	142,80	1,7360	228,6
2	20	HDPE	1800	275000	152,70	1,5620	220,0
3	20	HDPE	1500	253500	169,00	1,3020	202,8
4	20	HDPE	1000	224200	224,20	0,8680	179,3
5	20	HDPE	500	234400	468,90	0,4340	187,5
6	20	HDPE	200	169500	8475,00	0,1736	135,6
7	20	HDPE	100	127500	1275,00	0,0868	102,0
8	20	HDPE	50	95620	1905,00	0,0434	76,2
9	20	HDPE	20	63500	3175,00	0,01736	50,8

Tab. 8 Naměřené hodnoty HDPE s tryskou 30 mm na kap. reometru

Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	30	HDPE	2000	264700	132,30	1,7360	317,7
2	30	HDPE	1800	253700	140,90	1,5620	304,4
3	30	HDPE	1500	233800	155,80	1,3020	280,6
4	30	HDPE	1000	206800	206,80	0,8680	248,1
5	30	HDPE	500	224700	449,40	0,4340	269,6
6	30	HDPE	200	164700	823,90	0,1736	197,7
7	30	HDPE	100	126000	1260,00	0,0868	151,2
8	30	HDPE	50	94440	1888,00	0,0434	113,3
9	30	HDPE	20	64480	3224,00	0,01736	77,4

Tab. 9 Naměřené hodnoty PET s tryskou 10 mm na kap. reometru

Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	10	PET	2000	230500	115,20	1,7360	92,2
2	10	PET	1800	198300	110,10	1,5620	79,3
3	10	PET	1500	175800	117,20	1,3020	70,3
4	10	PET	1000	139700	139,70	0,8680	55,9
5	10	PET	500	84020	168,00	0,4340	33,6
6	10	PET	200	38100	190,50	0,1736	15,2
7	10	PET	100	18560	185,60	0,0868	7,4
8	10	PET	50	10740	214,90	0,0434	4,3
9	10	PET	20	4885	244,20	0,01736	2,0

Tab. 10 Naměřené hodnoty PET s tryskou 20 mm na kap. reometru

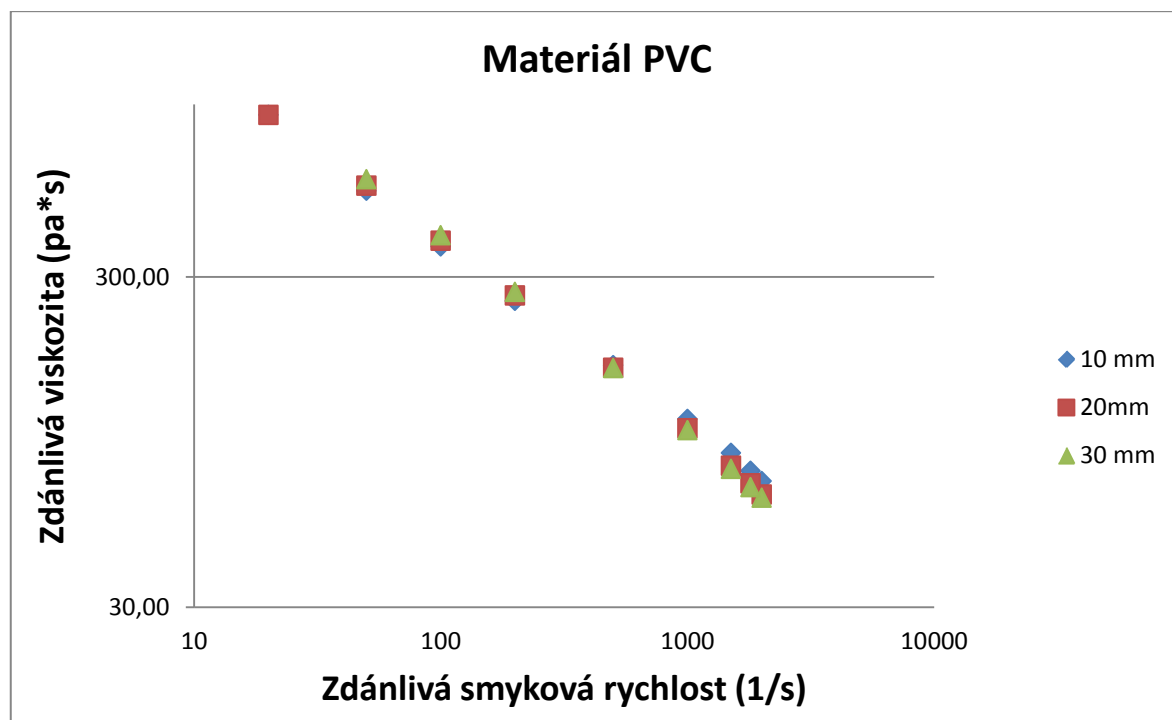
Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	20	PET	2000	266700	133,30	1,7360	213,3
2	20	PET	1800	266200	147,90	1,5620	212,9
3	20	PET	1500	206600	137,70	1,3020	165,3
4	20	PET	1000	172900	172,90	0,8680	138,3
5	20	PET	500	92330	184,60	0,4340	73,9
6	20	PET	200	41520	207,60	0,1736	33,2
7	20	PET	100	21980	219,80	0,0868	17,6
8	20	PET	50	11230	224,70	0,0434	9,0
9	20	PET	20	4885	244,20	0,01736	3,9

Tab. 11 Naměřené hodnoty PET s tryskou 30 mm na kap. reometru

Naměřené hodnoty kapilárního reometru Göttfert							
Měření	Tryska (mm)	Material	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Zdánlivé smykové napětí (Pa)	Zdánlivá viskozita (pa*s)	Rychlost pístu	Tlak (bar)
1	30	PET	2000	281000	140,50	1,7360	337,2
2	30	PET	1800	261100	145,10	1,5620	313,4
3	30	PET	1500	240600	160,40	1,3020	288,8
4	30	PET	1000	185600	185,60	0,8680	222,7
5	30	PET	500	111700	223,40	0,4340	134,0
6	30	PET	200	51130	255,60	0,1736	61,4
7	30	PET	100	26700	267,00	0,0868	32,0
8	30	PET	50	13350	267,00	0,0434	16,0
9	30	PET	20	5536	276,80	0,01736	6,6

## 6 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÝCH VISKOZIT

Experimentální výsledky ukazují na různorodou strukturu polymerů. Tato různorodost se projevila i na hodnotách a tvaru zdánlivé smykové viskozity, která se měřila na kapilárním reometru při třech různých délkách kapiláry.



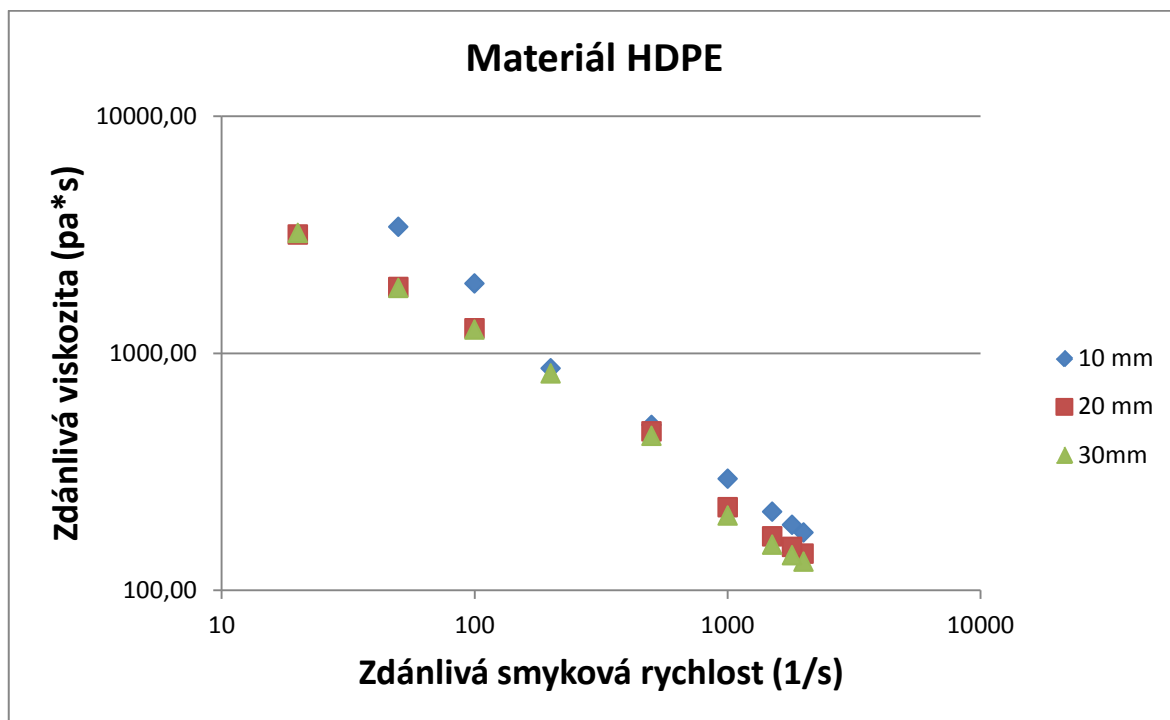
Graf 3 Závislost zdánlivé viskozity na zdánlivé smykové rychlosti u PVC

PVC viskozita se hodně mění v závislosti na velikosti smykové rychlosti. Při různých délkách kapiláry se její hodnoty také trochu liší. Při malých hodnotách smykové rychlosti se viskozita s délkou kapiláry nepatrně zvyšuje. Při smykové rychlosti  $500 \text{ s}^{-1}$  se zdánlivá viskozita v podstatě s délkou kapiláry nemění. Při vyšších hodnotách smykové rychlosti viskozita klesá s délkou kapiláry.

Největší rozdíl mezi viskozitou pro krátkou a dlouhou trysku je 12%. S tím, že pro většinu měřených bodů je hodnota viskozity měřena na delší kapiláře nižší než na krátké kapiláře. Toto indikuje, že tento rozdíl je způsoben viscoelaticitou polymerů, kdy materiál přechází z rezervoáru do kapiláry a je urychlován, proti čemuž vyvíjí odpor.



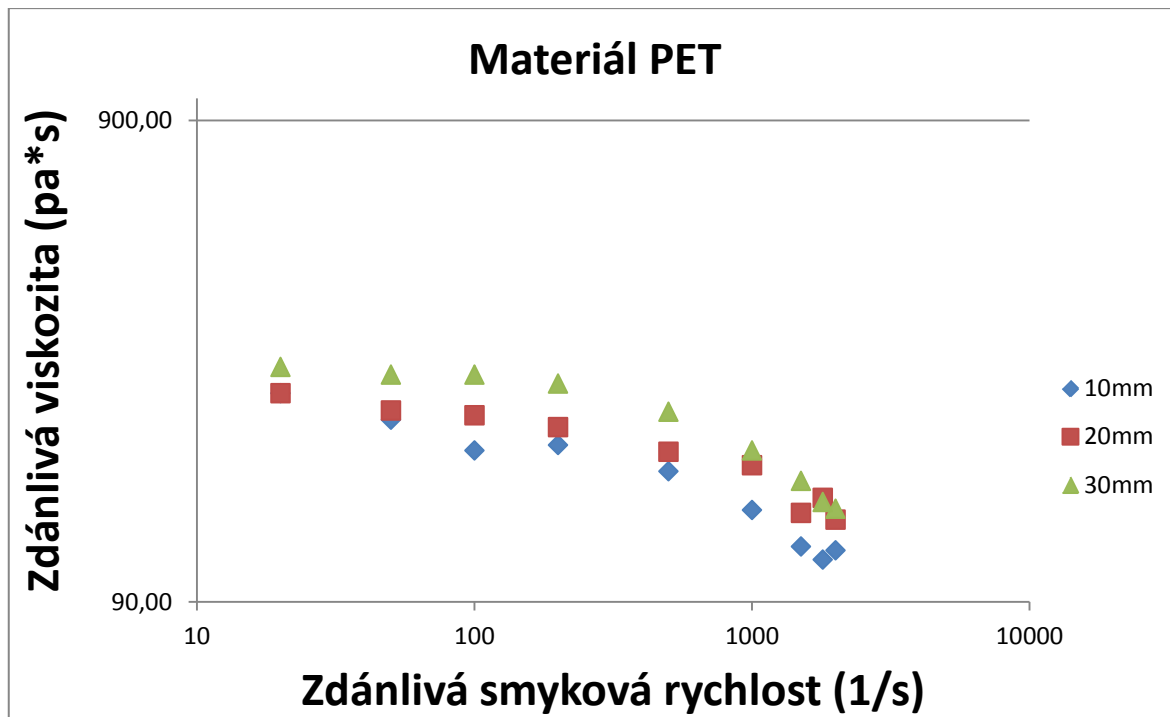
Tento odpor je korigován tzv. Bagleyho korekcí, která by se musela provádět z měření na různých kapilárách. Vzhledem k tomu, že jsme prováděli měření pouze na jedno kapilárním reometru, tak jsem tuto korekci neprováděl.



Graf 4 Závislost zdánlivé viskozity na zdánlivé smykové rychlosti u HDPE

HDPE- viskozita se hodně mění v závislosti na velikosti smykové rychlosti. S prodlužováním kapiláry se zdánlivá viskozita zmenšuje. Snižování viskozity s délkou kapiláry je možné sledovat jak při malých tak i při vyšších smykových rychlostech.

Co bylo řečeno o rozdílech viskozit mezi krátkou a delší tryskou u PVC platí ještě ve větší míře pro HDPE protože tento materiál je více viskoelastický než PVC.



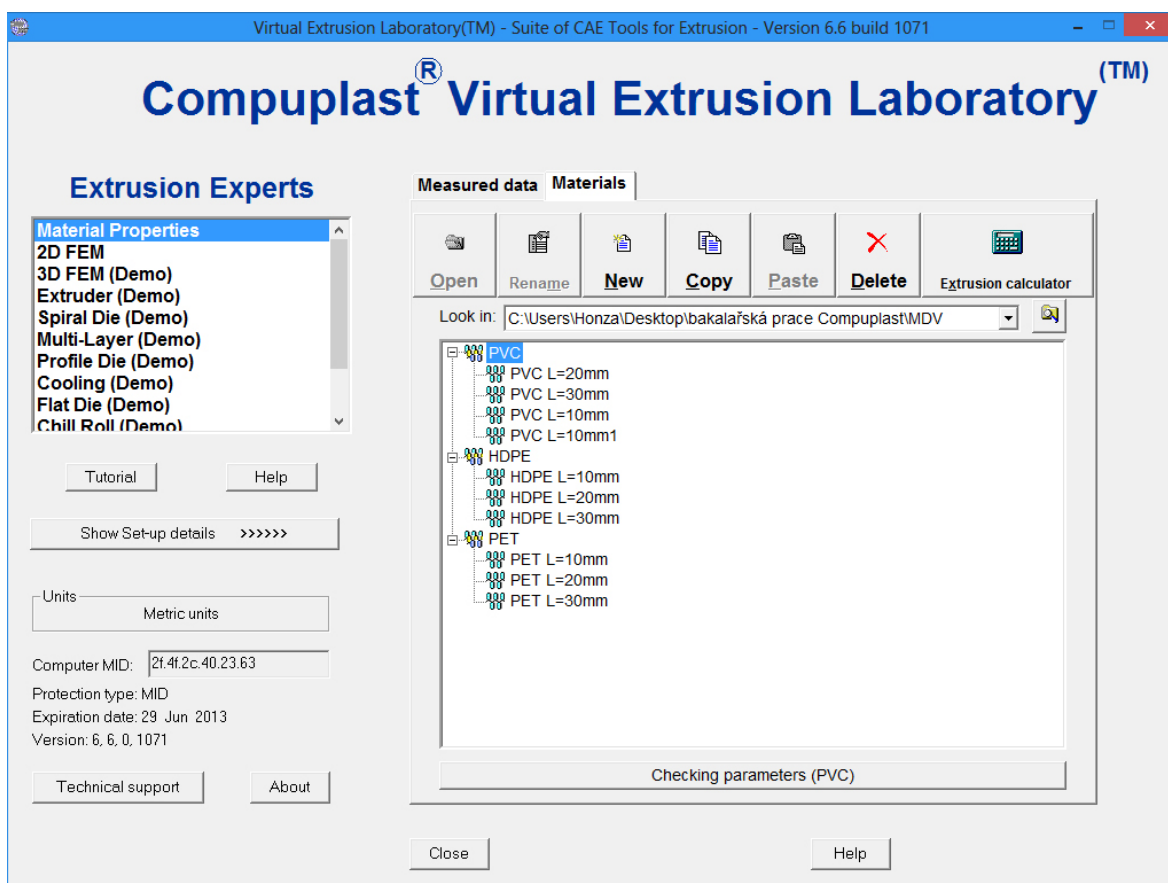
Graf 5 Závislost zdánlivé viskozity na zdánlivé smykové rychlosti u PET.

PET – Výsledky jsou úplně odlišné od výsledků PVC a HDPE. Zdánlivá smyková viskozita závisí mnohem méně na smykové rychlosti a materiál se svým chováním blíží newtonskému materiálu. S prodlužováním kapiláry se viskozita zvyšuje jak při malých, tak i při velkých hodnotách smykové rychlosti.

U PET materiálu je situace obrácená, než byla u předchozích dvou materiálů. Zároveň je známo, že PET materiál je velmi málo viskoelastický. Proto fakt, že pro různé kapiláry dostáváme různé viskozity je pravděpodobně nutné hledat v jiném důvodu než je přechod z rezervoáru do kapiláry. Jako jedno z mnoha vysvětlení se nabízí, že materiál během toku vytváří vnitřní strukturu, která jej zpevňuje. To se samozřejmě více projeví na dlouhé trysce.

## 7 MODELOVÁNÍ TOKU

Pro modelování toku v programu Virtual Extrusion Laboratory<sup>®</sup> je důležité získat z měření materiálové charakteristiky. Jako první krok při modelování chování daného materiálu je důležité získat z měřených viskozitních dat materiálů konstanty viskozitního modelu, který je použit pro řešení toku. V našem případě se jedná o PVC, HDPE a PET materiály.

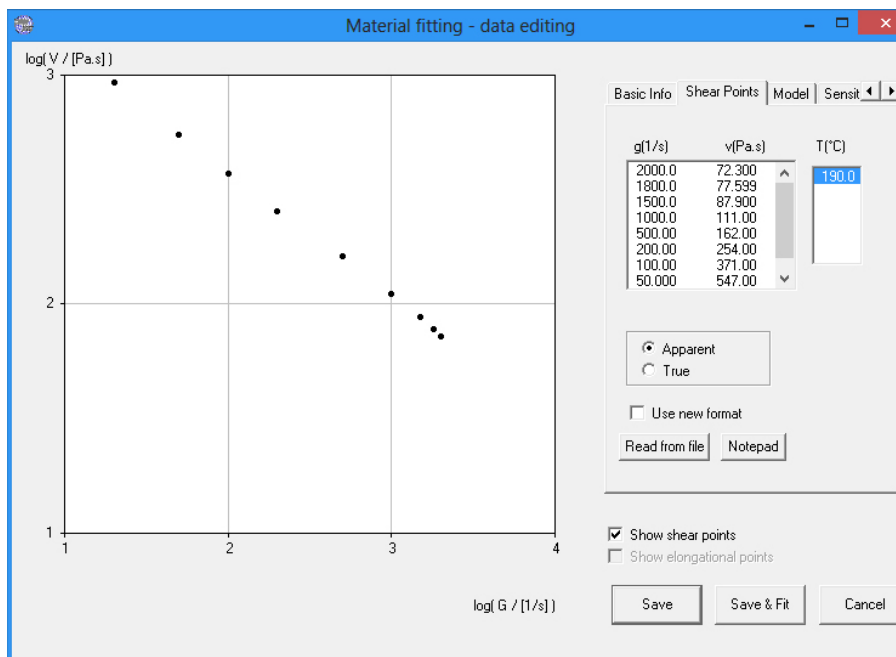


Obr. 19 Úvodní nastavení materiálů

Materiálové charakteristiky je třeba získat pro každou použitou tryskou, s kterou se bude pracovat., protože každé měření nám vlastně charakterizuje jeden materiál. V programu pro fitování měřených dat se musí zadat naměřené body viskozity pro dané smykové rychlosti a teplotu. Musí se také zadat, že měřená data jsou zdánlivá data, takže program provede Rabinowitschovu korekci. Abychom ukázali vliv Rabinowitschovy korekce, provedli jsme fitování také jako korigovaná data, takže program neprováděl žádnou korekci. Cíle

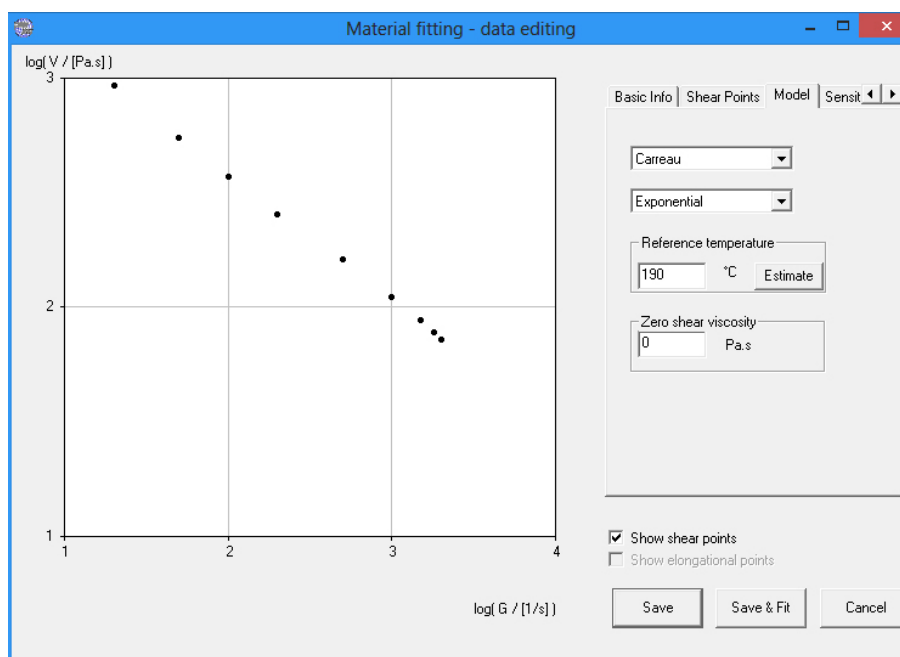
toho je ukázat, jaké chyby se dopustíme, když Rabinowitschovu korekci zanedbáme (Osswald, 1989).

Pro fitování byl vybrán Carreauv model, který je nejvhodnější pro popis materiálové viskozity (Osswald, 2006, Compuplast manuál).

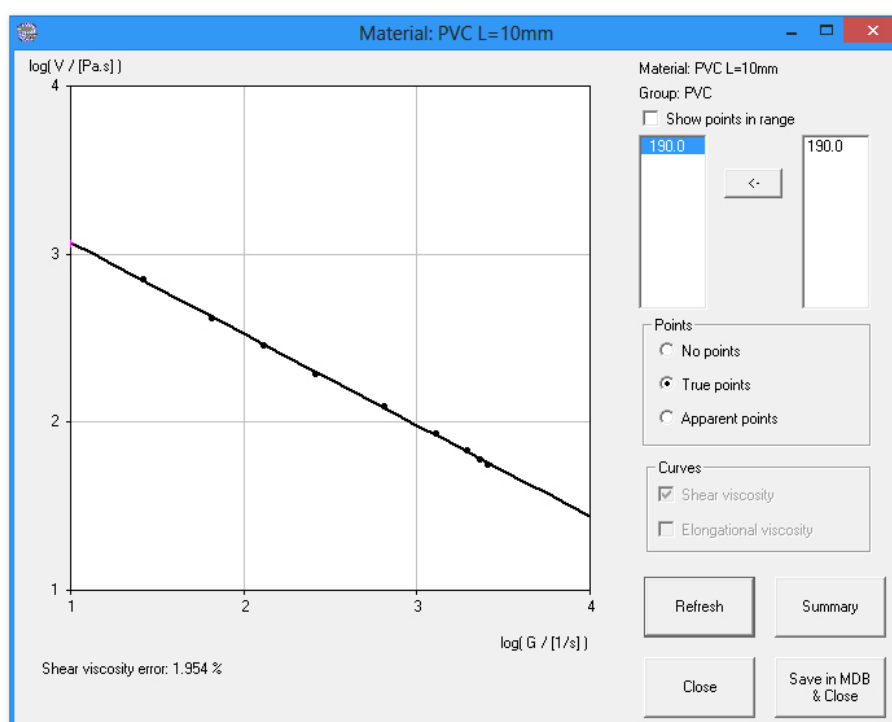


Obr. 20 Zadání měřených viskozitních dat

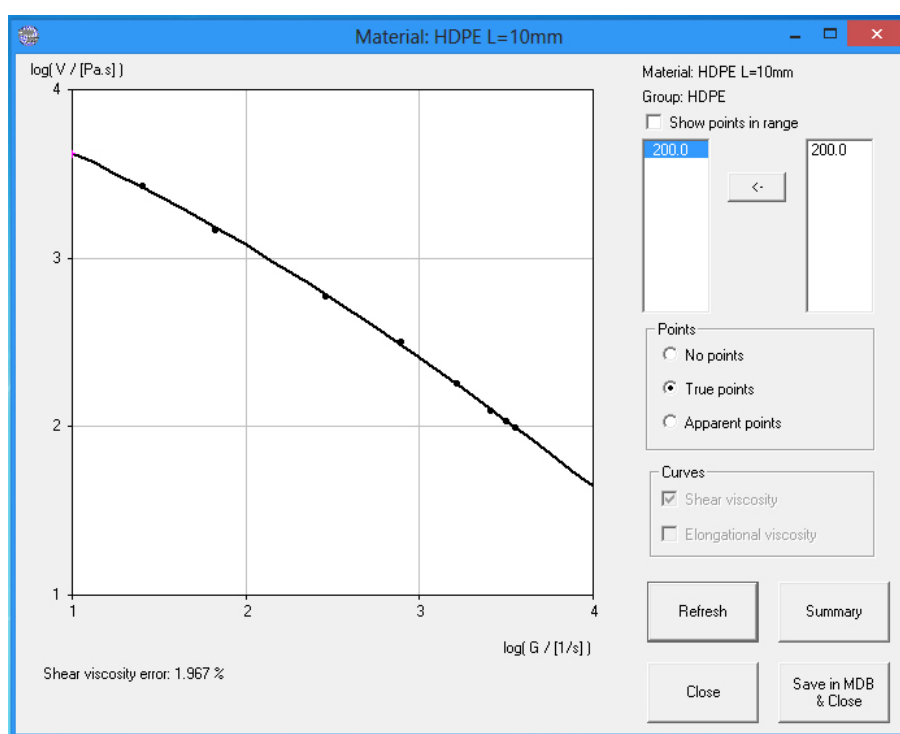
Hodnoty naměřené kapilárním reometrem upravíme pomocí programu o tzv. Rabinowitschovu korekci, která představuje zahrnutí odchylky od ideálního „newtonovského“ chování.



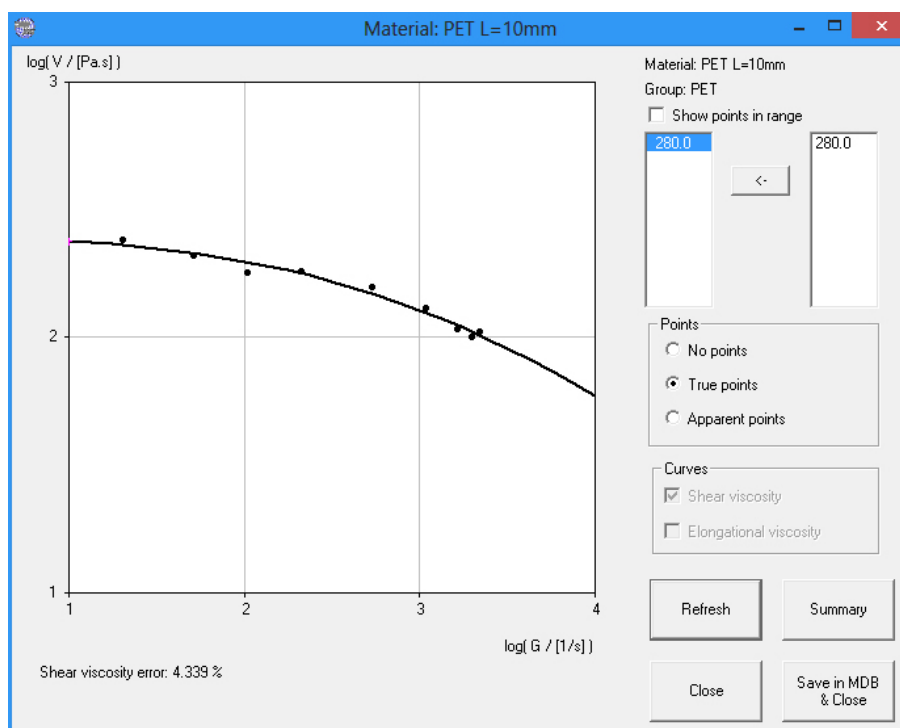
Obr. 21 Výběr modelu



Obr. 22 Porovnání vypočtené křivky z modelů a měřených dat pro PVC a délku kapiláry 10 mm. Chyba fitování 1,954 %

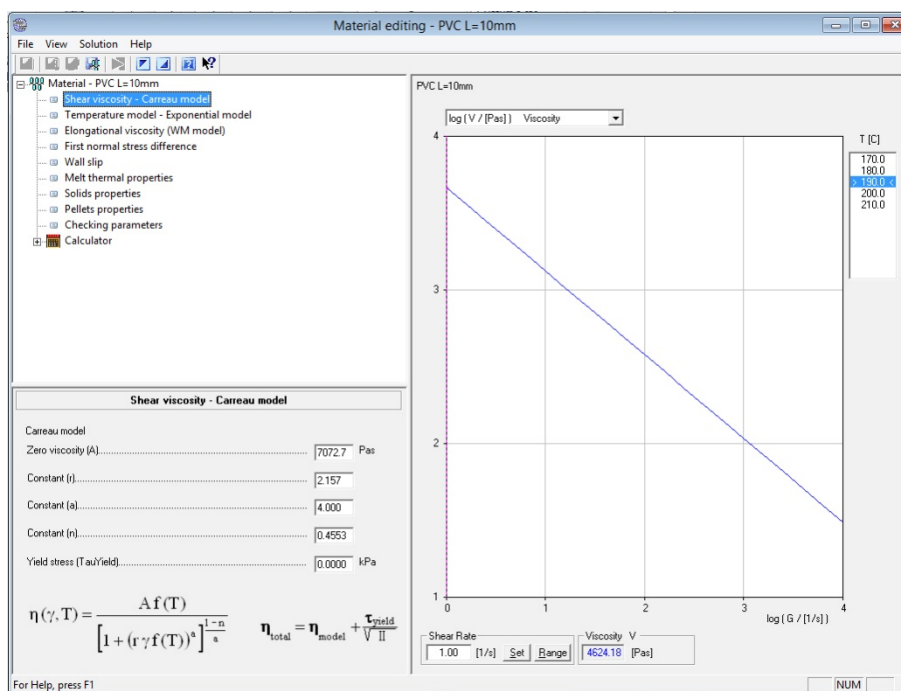


Obr. 23 Porovnání vypočtené křivky z modelů a měřených dat pro HDPE a délku kapiláry 10 mm Chyba fitování 1,967 %



Obr. 24 Porovnání vypočtené křivky z modelů a měřených dat pro PET a délku kapiláry 10 mm. Chyba fitování 4,339 %.

Chyby fitování pro uvedené materiály jsou menší než 5%. Také u ostatních fitovaných viskozit byla chyba fitování menší než 5%. To ukazuje, že měření bylo provedeno velmi pečlivě, protože zkušenost ukazuje, že není mnoho měření s přesností měření než 5%. (Compuplast manual).

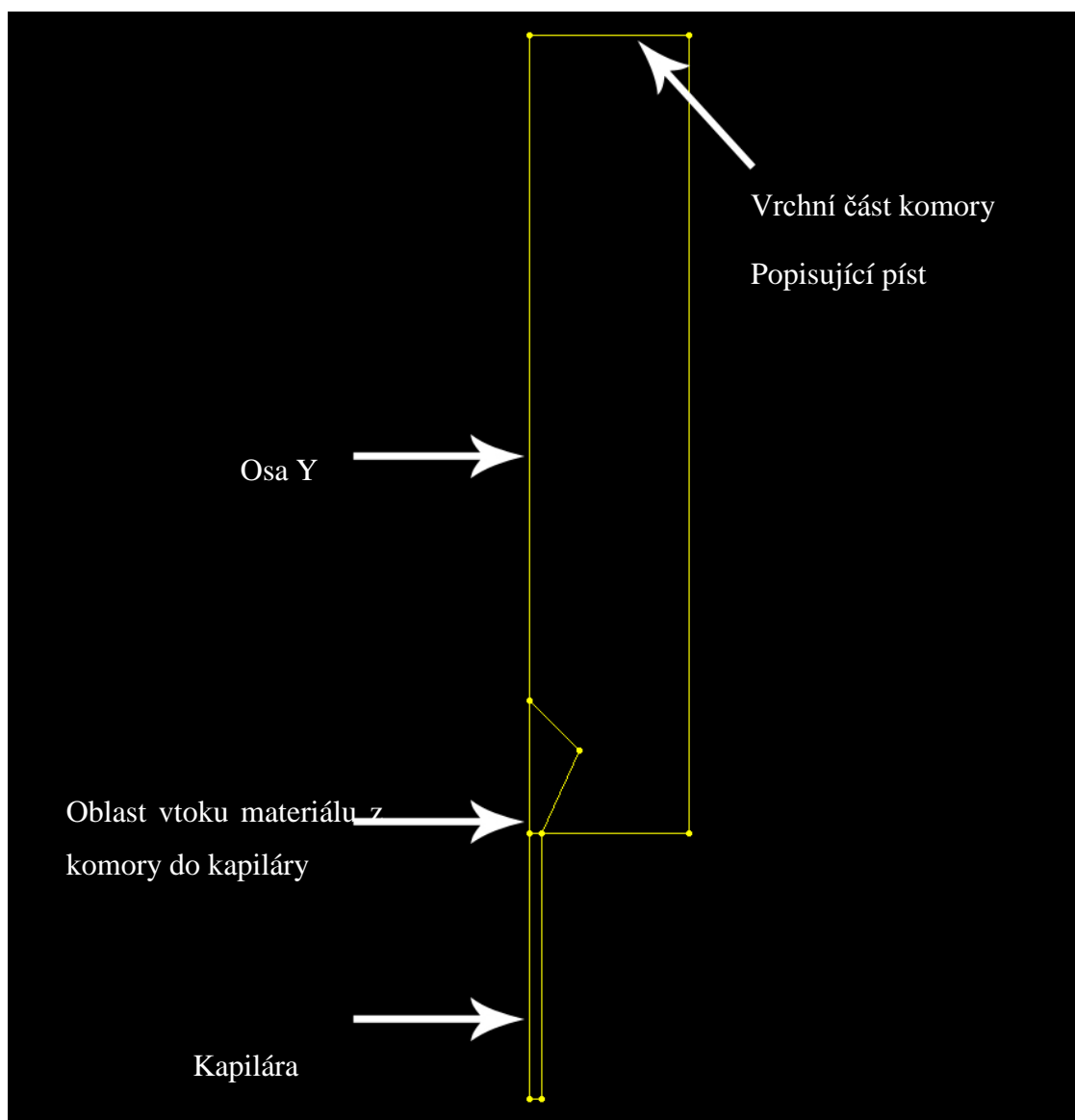


Obr. 25 Materiálová viskozita včetně Rabinowitschovy korekce

Pro detailnější studium chování materiálů je možné do programu zadat další informace o materiálech týkající se viskoelastivity. Pro můj experiment stačí údaje, které mi poskytli kapilární reometr. Kromě tokových vlastností se musí také zadat termální vlastnosti pro taveninu. Kde jsem použil hodnot, které nabízí program jako výchozí hodnoty.

Jak již bylo řečeno, viskozitní data byla fitována bez Rabinowitschovy korekce a s provedením této korekce. Správné je fitování s provedením korekce, ale chtěli jsme ukázat jaký vliv na výsledky má neprovedení této korekce.

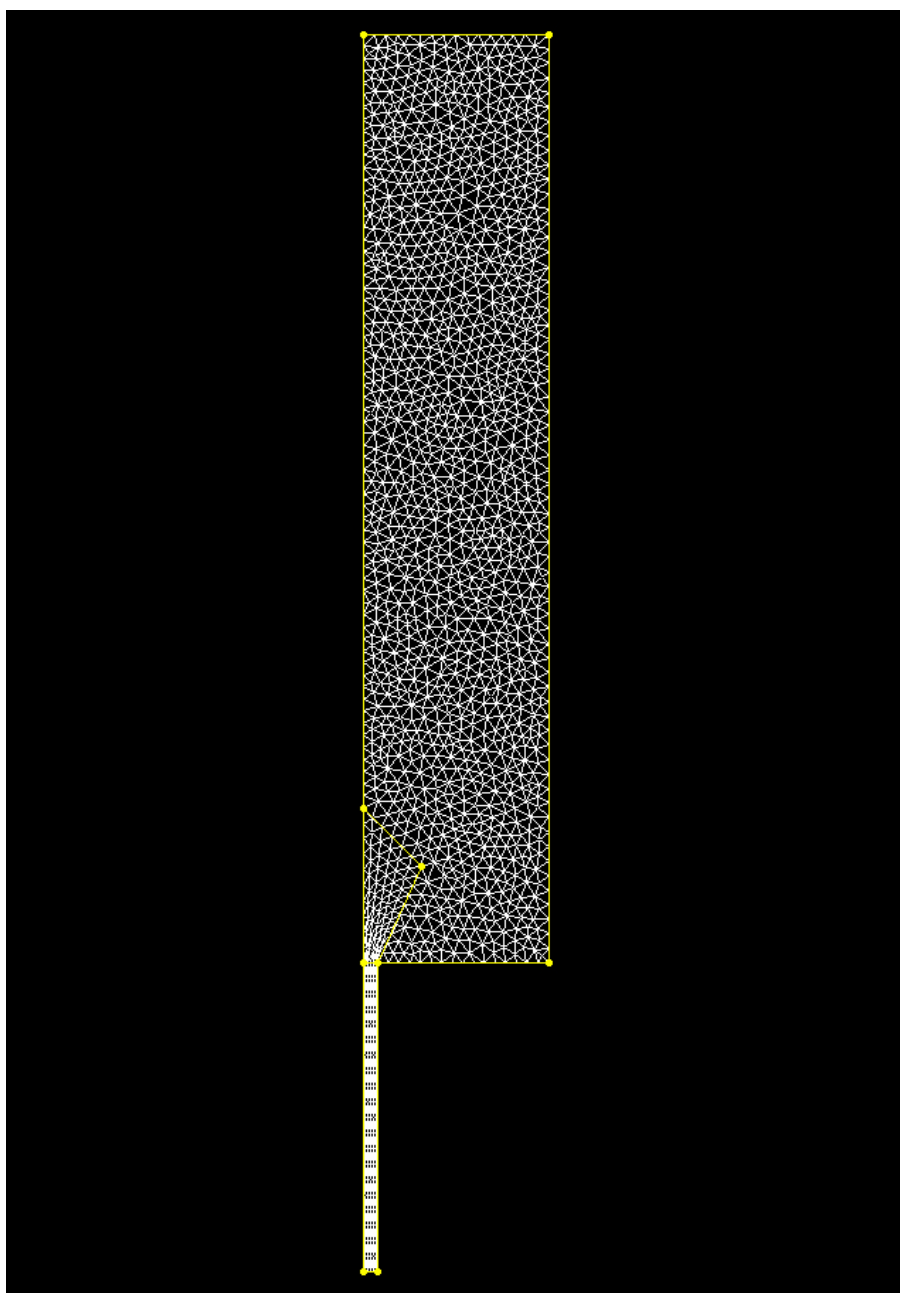
Po zadání materiálových vlastností je třeba definovat tokovou doménu, ve které se bude materiál pohybovat. V mém případě se materiál bude nacházet ve vyhřívané komoře kapilárního reometru a bude vytékat kapilárou.



Obr. 26 Tvorba geometrie

Toková doména je definována body, hraničními polylinami a v některých částech super elementy. Super-elementy jsou použity pro lepší kontrolu generované mřížky. Po nadefinování oblastí reometru je třeba pokrýt tokovou doménu sítí, která dovoluje řešení toku materiálů.





Obr. 27 Síť použita pro řešení

Po definici sítě se musí nadefinovat hraniční podmínky, které vlastně určují tok materiálů.

Na následujícím obr. 30 vidíme tokovou doménu a její hranice:

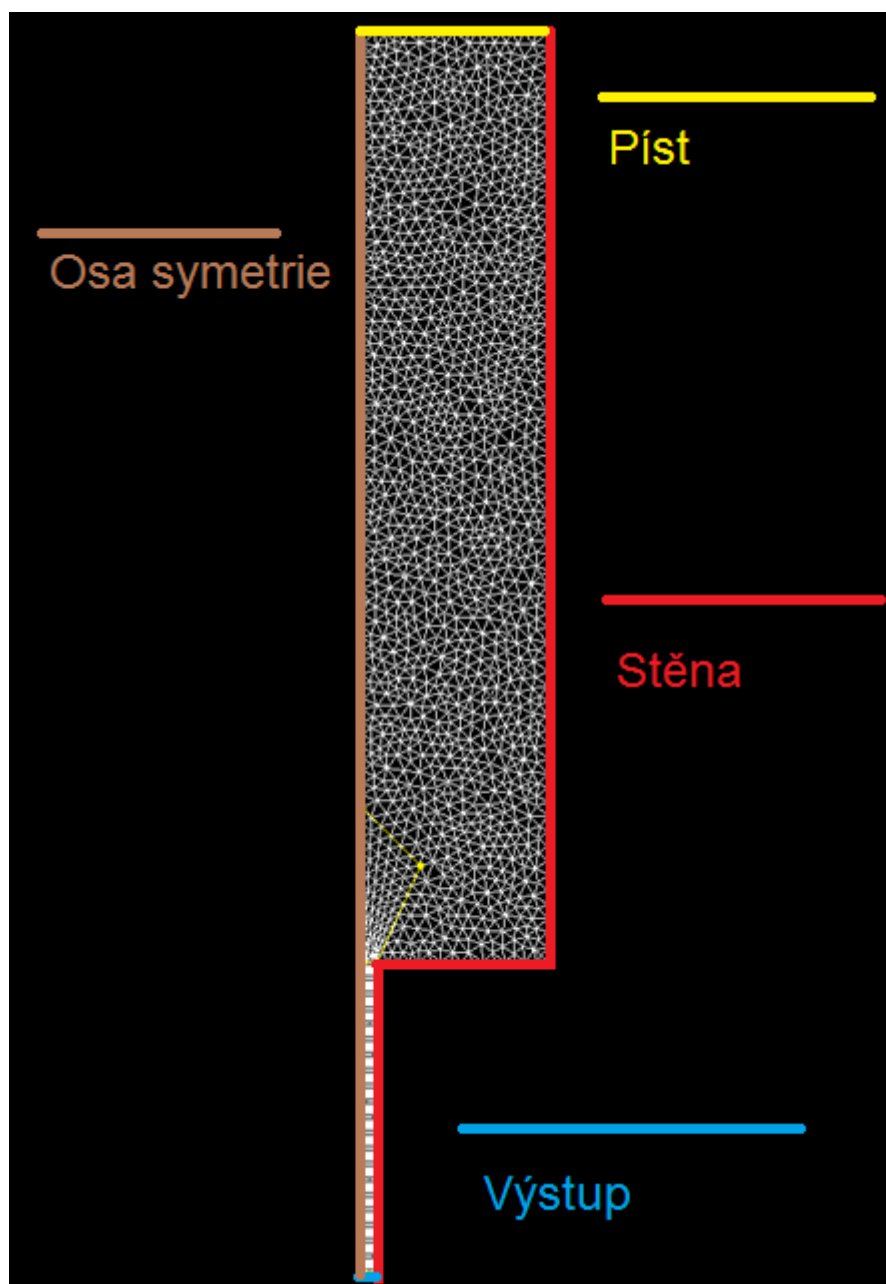
- Osa symetrie
- Stěna
- Výstup
- Píst

Osa symetrie znamená, že materiál nesmí tuto osu překročit, ale materiál může téci bez omezení podél osy.

Stěna znamená, že se zadává teplota stěny a obě složky rychlosti jsou zde nulové. Teplota stěny byla nastavena pro každý materiál a byla rovna teplotě vytlačování

Výstup znamená, že materiál může téci bez omezení kolmo na výstup, ale nemůže téci ve směru hranice.

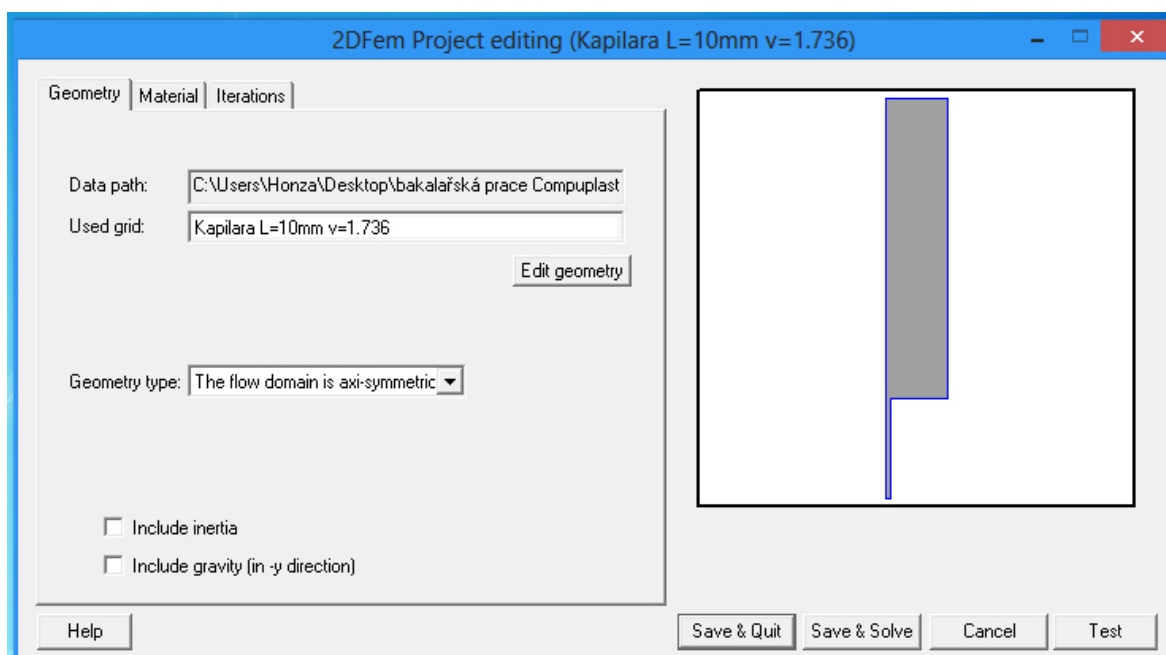
Píst znamená, že materiál teče kolmo na hranici konstantní rychlostí, rovnou rychlostí pístu. Rychlost ve směru hranice je nulová.



Obr. 28 Hranice tokové domény

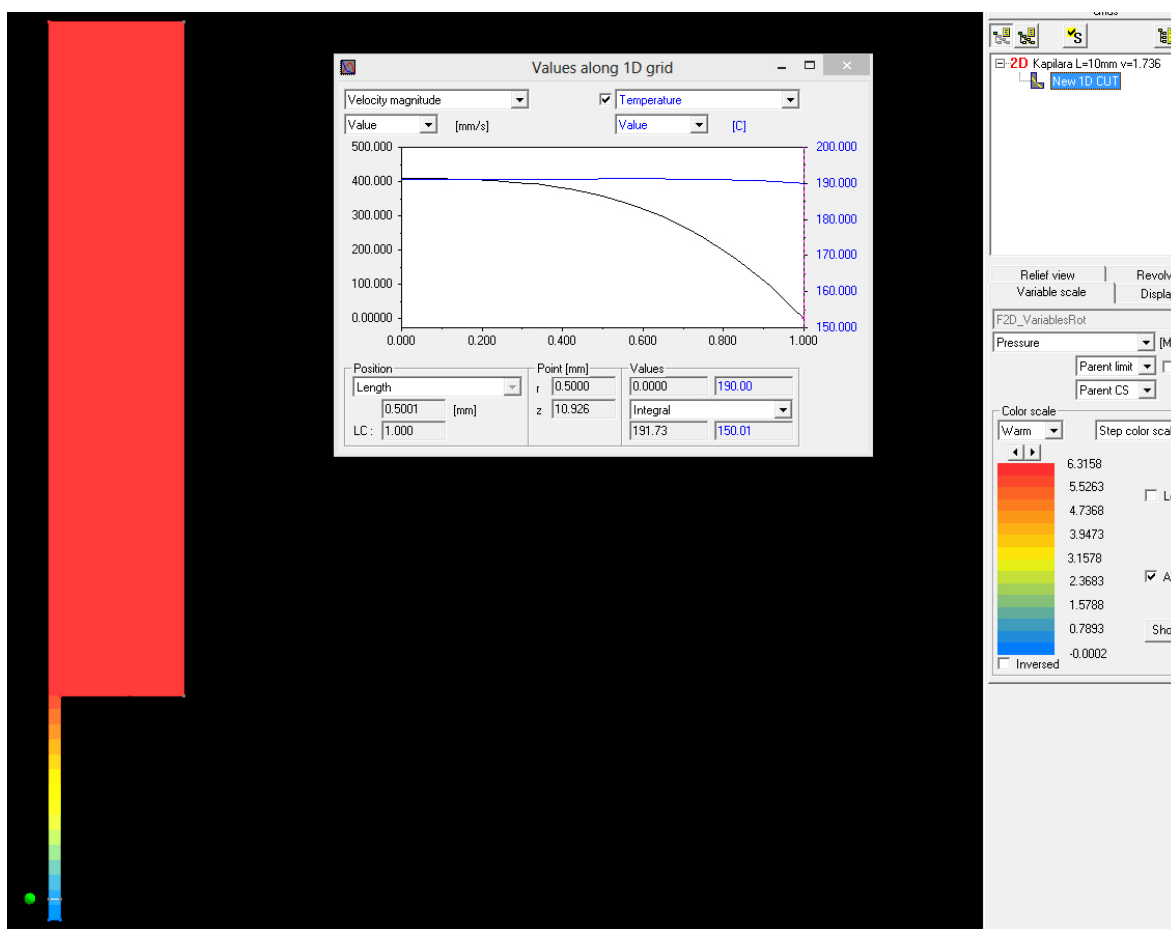
Po nadefinování materiálových vlastností vytvoření sítě a definici hraničních podmínek pro řešení je třeba zadat tzv. Projekt pro řešení.

Zde je geometrie spojena s materiálem a jsou zde definovány podmínky konvergence. To znamená maximální počet interakcí a nastavení chyby, kdy se řešené rovnice považují za splněné.



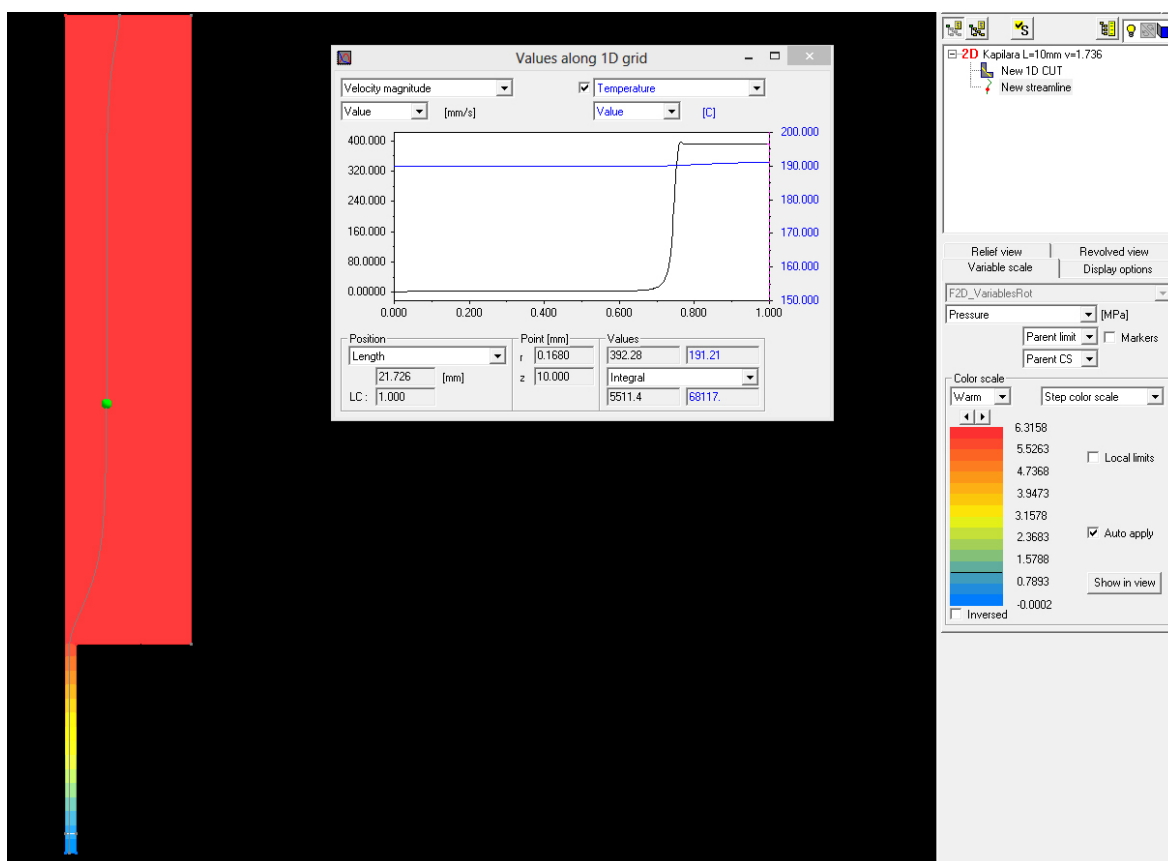
Obr. 29 Projektová editace

Po editaci projektové části je možné spustit simulaci. Po provedení nezbytných iterací, kdy jsou splněny podmínky konvergence, se řešení ukončí, výsledky se uloží a program otevře okno, kde je možno vidět výsledky.



Obr. 30 Tlakové pole na tokové doméně a rychlostní a teplotní profil na řezu před výstupem z kapiláry.

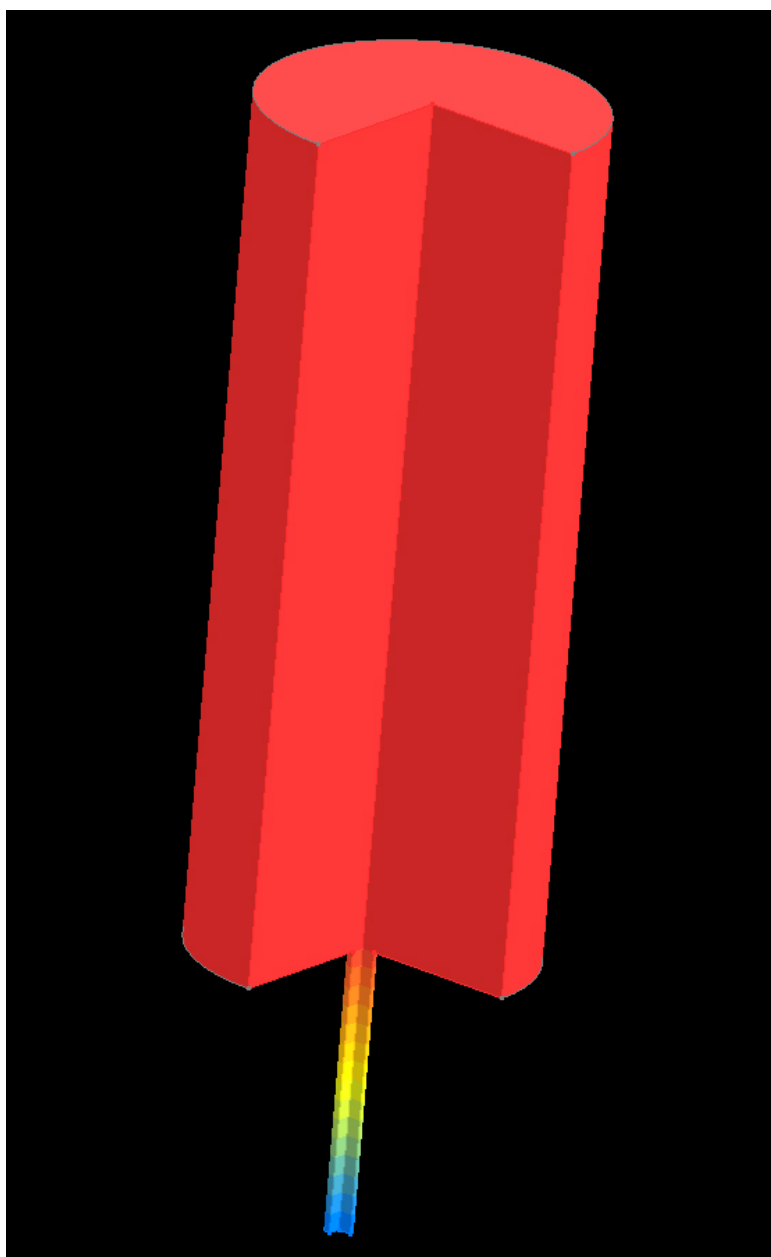
Rychlostní profil (černá křivka) vykazuje semi-parabolický profil. Teplotní profil (modrá křivka) ukazuje, že materiál se během toku v kapiláře nezahřeje. Jeho teplota se neliší od teploty v kapiláře. Další možnost, jak studovat chování materiálu je pohybovat se s materiálovou částicí, jak teče tokovým polem.



Obr. 31 Tlakové pole na tokové doméně a průběh rychlosti a teploty během toku částice tokovou doménou.

V grafu je ukázán průběh rychlosti (černá křivka) a teploty (modrá křivka). Je vidět prudké zrychlení materiálu v oblasti zúžení tokové domény. Je taky vidět, jak vzrůstá teplota během toku. Tento vzrůst není ale nijak dramatický, méně než 2°C.

Pro představu, jak vypadá modelovaná toková doména ukážeme její 3D reprezentaci.



Obr. 32 Tlakový profil v tokové doméně ve 3D tvaru.

Pro srovnání měřených a vypočtených hodnot tlaku na píst jsme použili maximální hodnotu tlaku, která se vygeneruje v tokové doméně.

## 7.1 VÝSLEDKY MODELOVÁNÍ MĚŘENÍ PROVEDENÝCH NA REOMETRU

Pro modelování byly použity podmínky, které byly nastaveny při reálném měření tzn., že modelování se dělalo pro všechny materiály pro 3 kapiláry a pro rychlosti posuvu pístu, které byly použity pro měření. Jak bylo uvedeno v cíli práce, snažili jsme se ohodnotit modelováním kvalitu naměřených dat a kvalitu tokových křivek. Proto jsme odečítali maximální hodnotu tlaku, která se v tokové doméně vytvoří a to pod pístem. Všimli jsme si také vypočtené smykové rychlosti na stěně kapiláry, kterou jsme porovnávali s nastavenou zdánlivou smykovou rychlostí. Z modelování jsme také odečetli hodnoty teploty na výstupu z kapiláry.

Modelování bylo provedeno z Rabinowitschovou korekcí kdy viskozita byla zadána jako zdánlivá a korekce byla provedena během fitování. Abychom demonstrovali vliv Rabinowitschovy korekce zadali jsme materiály ještě jednou a provedli jsme fitování bez této korekce, tzn. jako by viskozity byly měřené jako skutečné viskozity. Pro oba takto získané materiály jsme provedli modelování. A získali jsme hodnoty tlaku. Ty jsou uvedeny jako Tlak TRUE (hodnoty vypočtené z nekorigované viskozity) a Tlak APPARENT (hodnoty vypočtené z korigované viskozity). Vzhledem k tomu že viskozita byla měřena ve skutečnosti jako zdánlivá musíme pro srovnání s měřením použít hodnotu tlak APPARENT.



Tab. 12 Namodelované hodnoty PVC s tryskou 10 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
10	PVC	2437	71	63,158	191,23
10	PVC	2188	67	60	191,23
10	PVC	1828	62	55,3	191,08
10	PVC	1218	51	45,9	190,1
10	PVC	609	37	33,4	190,6
10	PVC	236	24	2,19	190,3
10	PVC	118	18	15,9	190,2
10	PVC	59	13	11,6	190,9
10	PVC	23	8	7,6	190

Tab. 13 Namodelované hodnoty PVC s tryskou 20 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
20	PVC	2552	125	110,1	191,4
20	PVC	2293	120	106,2	191,34
20	PVC	1906	112,62	99,1	191,29
20	PVC	1263	96,08	84,7	191,1
20	PVC	625	72,56	64,1	190,83
20	PVC	237	49,25	43,7	190,62
20	PVC	118	36,14	32,1	190,25
20	PVC	58,5	26,1	23,3	190,09
20	PVC	23,1	16,75	14,9	190,02

Tab. 14 Namodelované hodnoty PVC s tryskou 30 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
30	PVC	2663	181	159,4	191,33
30	PVC	2321	175	153,5	191,35
30	PVC	1930	164	144	191,34
30	PVC	1279	141	124,1	191,09
30	PVC	632	108	95,4	190,85
30	PVC	240	74	66,3	190,66
30	PVC	119	55	49,4	190,24
30	PVC	58	41	36,4	190,1
30	PVC	23	26	23,8	190,02

Tab. 15 Namodelované hodnoty HDPE s tryskou 10 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
10	HDPE	2875	176	153,7	201,84
10	HDPE	2586	171	149,4	202,19
10	HDPE	2047	163	142,6	202,13
10	HDPE	1350	145	127	201,94
10	HDPE	659	116	102,5	201,61
10	HDPE	244	85	75,2	201,28
10	HDPE	120	65	57,6	200,63
10	HDPE	59	48	43	200,25
10	HDPE	23	31	27,9	200,08

Tab. 16 Namodelované hodnoty HDPE s tryskou 20 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
20	HDPE	3126	267	231,9	202,03
20	HDPE	2801	262	227,6	201,77
20	HDPE	2310	253	220,2	201,9
20	HDPE	1428	235	203,9	201,86
20	HDPE	694	200	176,3	201,76
20	HDPE	249	155	137,8	201,59
20	HDPE	121	121	108	200,72
20	HDPE	58,6	89	80,2	200,24
20	HDPE	22,4	55	49,3	200,07

Tab. 17 Namodelované hodnoty HDPE s tryskou 30 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
30	HDPE	3196	364	314,4	202,04
30	HDPE	2865	358	309,4	201,98
30	HDPE	2364	347	300,9	201,89
30	HDPE	1555	324	281,9	201,59
30	HDPE	707	283	249,4	201,8
30	HDPE	252	226	199,6	201,47
30	HDPE	122	179	160	200,65
30	HDPE	58	134	119,8	200,05
30	HDPE	22,3	82	72,8	200,07

Tab. 18 Namodelované hodnoty PET s tryskou 10 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
10	PET	2135	97	92,2	208,08
10	PET	1916	90	85,5	281,36
10	PET	1590	79	75	281,18
10	PET	1049	58	55,4	280,89
10	PET	516	33	32,3	280,51
10	PET	203	15	15,1	280,25
10	PET	100	8	8,2	280,08
10	PET	49	4,5	4,4	280,02
10	PET	19	1,9	1,8	280

Tab. 19 Namodelované hodnoty PET s tryskou 20 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
20	PET	2114	233	221,6	282,2
20	PET	1896	215	204,9	282,17
20	PET	1573	187	178,7	281,19
20	PET	1035	136	130	280,72
20	PET	509	76	74	280,34
20	PET	200	34	33,3	280,09
20	PET	99	17	17,6	280,7
20	PET	49	9	9,2	280,01
20	PET	19	3,7	3,8	280

Tab. 20 Namodelované hodnoty PET s tryskou 30 mm

Namodelované hodnoty - 2D-FEM					
Tryska (mm)	Materiál	Smyková rychlost (1/s)	Tlak (bar) TRUE	Tlak (bar) APPARENT	Teplota (°C)
30	PET	2249	370	346	282,37
30	PET	2008	348	325	281,26
30	PET	1651	311	291	282,05
30	PET	1069	237,5	226,3	281,58
30	PET	513	139	132,3	280,93
30	PET	199	61	60,2	280,37
30	PET	98,6	31	31,6	280,08
30	PET	49,1	16	16,2	280,03
30	PET	19,06	6	6,6	280

Při pohledu na vypočtené koncové teploty ve všech tabulkách vidíme, že tyto teploty se jen nepatrně liší od počáteční teploty. Proto můžeme všechna měření považovat za izotermální. Tzn. měřit pro teplotu, která byla nastavena na reometru a výsledky měření nejsou ovlivněny disipací a tím ohříváním materiálů.

## 7.2 SROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MODELOVÁNÍ S MĚŘENÝMI HODNOTAMI

Jak bylo řečeno hlavním cílem je srovnat vypočtený tlak pod pístem s naměřenou hodnotou tlaku a tím ohodnotit, zda viskozita, která byla získána z měření je správně vyhodnocena a tudíž může být použita pro další modelování. Následující tabulky ukazují srovnání vypočteného a naměřeného tlaku pro všechny materiály a všechny trysky. Tabulky také ukazují skutečné smykové rychlosti na stěně kapiláry a nastavené smykové rychlosti pro měření čímž je vidět rozdíl mezi zdánlivou a skutečnou smykovou rychlostí.

Tab. 21 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PVC 10mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	10	PVC	1,7360	2000	2437	57,8	63,158	0,92
2	10	PVC	1,5620	1800	2188	55,9	60	0,93
3	10	PVC	1,3020	1500	1828	52,8	55,3	0,95
4	10	PVC	0,8680	1000	1218	44,4	45,9	0,97
5	10	PVC	0,4340	500	609	32,4	33,4	0,97
6	10	PVC	0,1736	200	236	20,3	2,19	9,28
7	10	PVC	0,0868	100	118	14,9	15,9	0,93
8	10	PVC	0,0434	50	59	10,9	11,6	0,94
9	10	PVC	0,01736	20	23	7,4	7,6	0,98

Tab. 22 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PVC 20mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	20	PVC	1,7360	2000	2552	105,1	110,1	0,95
2	20	PVC	1,5620	1800	2293	102,3	106,2	0,96
3	20	PVC	1,3020	1500	1906	96,5	99,1	0,97
4	20	PVC	0,8680	1000	1263	83,6	84,7	0,99
5	20	PVC	0,4340	500	625	63,7	64,1	0,99
6	20	PVC	0,1736	200	237	42,2	43,7	0,97
7	20	PVC	0,0868	100	118	30,9	32,1	0,96
8	20	PVC	0,0434	50	58,5	22,7	23,3	0,97
9	20	PVC	0,01736	20	23,1	14,9	14,9	1,00

Tab. 23 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PVC 30mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	30	PVC	1,7360	2000	2663	154,3	159,4	0,97
2	30	PVC	1,5620	1800	2321	149,6	153,5	0,97
3	30	PVC	1,3020	1500	1930	141,4	144	0,98
4	30	PVC	0,8680	1000	1279	123,4	124,1	0,99
5	30	PVC	0,4340	500	632	95,4	95,4	1,00
6	30	PVC	0,1736	200	240	64,9	66,3	0,98
7	30	PVC	0,0868	100	119	48,1	49,4	0,97
8	30	PVC	0,0434	50	58	35,6	36,4	0,98
9	30	PVC	0,01736	20	23	23,8	23,8	1,00

Porovnání vypočtených a naměřených tlaků ukazuje, že pro PVC materiál jsou největší odchylky na krátké trysce 10 mm čím je tryska delší tím se podíl měřené a vypočtené hodnoty blíží k 1 a tím je měření přesnější. Tento jev je pravděpodobně možné vysvětlit tím, že v krátké trysce se tok PVC ještě úplně nestabilizoval a tím je hodnota měřeného tlaku ovlivněna přechodem materiálu z rezervoálu do kapiláry. Druhá možnost vysvětlení je, že

PVC materiál klouže po stěně a skluz je snažší při menší kontaktní ploše mezi materiálem a tryskou, tzn. při kratší trysce. Nepřímou indikací je fakt, že naměřený tlak je nižší než vypočtený.

Hodnoty skutečné smykové rychlosti byly zhruba o  $\frac{1}{4}$  vyšší než nastavené zdánlivé hodnoty. Rabinowitschova korekce je dána podílem  $13 \frac{1+3n}{4n}$  kde  $n$  je okamžitá směrnice smykové křivky. To ukazuje, že hodnota  $n$  je cca 0,5. Tuto hodnotu jsme také odečetli z grafu viskozity PVC materiálu.

Tab. 24 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro HDPE 10mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	10	HDPE	1,7360	2000	2875	140,3	153,7	0,91
2	10	HDPE	1,5620	1800	2586	136,0	149,4	0,91
3	10	HDPE	1,3020	1500	2047	128,9	142,6	0,90
4	10	HDPE	0,8680	1000	1350	118,4	127	0,93
5	10	HDPE	0,4340	500	659	99,7	102,5	0,97
6	10	HDPE	0,1736	200	244	69,2	75,2	0,92
7	10	HDPE	0,0868	100	120	52,4	57,6	0,91
8	10	HDPE	0,0434	50	59	39,5	43	0,92
9	10	HDPE	0,01736	20	23	27,4	27,9	0,98



Tab. 25 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro HDPE 20mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	20	HDPE	1,7360	2000	3126	228,6	231,9	0,99
2	20	HDPE	1,5620	1800	2801	220,0	227,6	0,97
3	20	HDPE	1,3020	1500	2310	202,8	220,2	0,92
4	20	HDPE	0,8680	1000	1428	179,3	203,9	0,88
5	20	HDPE	0,4340	500	694	187,5	176,3	1,06
6	20	HDPE	0,1736	200	249	135,6	137,8	0,98
7	20	HDPE	0,0868	100	121	102,0	108	0,94
8	20	HDPE	0,0434	50	58,6	76,2	80,2	0,95
9	20	HDPE	0,01736	20	22,4	50,8	49,3	1,03

Tab. 26 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro HDPE 30mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	30	HDPE	1,7360	2000	3196	317,7	314,4	1,01
2	30	HDPE	1,5620	1800	2865	304,4	309,4	0,98
3	30	HDPE	1,3020	1500	2364	280,6	300,9	0,93
4	30	HDPE	0,8680	1000	1555	248,1	281,9	0,88
5	30	HDPE	0,4340	500	707	269,6	249,4	1,08
6	30	HDPE	0,1736	200	252	197,7	199,6	0,99
7	30	HDPE	0,0868	100	122	151,2	160	0,95
8	30	HDPE	0,0434	50	58	113,3	119,8	0,95
9	30	HDPE	0,01736	20	22,3	77,4	72,8	1,06

Porovnání vypočtených a naměřených tlaků ukazuje, že pro HDPE materiál jsou opět největší odchylky na krátké trysce 10 mm. Čím je tryska delší tím se podíl měřené a vypočtené hodnoty blíží k 1, ale shoda není tak kvalitní jako u PVC materiálu. Toto je pravděpodobně způsobeno viskoelasticitou HDPE materiálu kdy se projevuje vliv přechodu materiálu z rezervoáru do kapiláry.

Podíl skutečné smykové rychlosti a zdánlivé rychlosti roste s rychlostí pístu. To ukazuje, že lokální směrnice viskozity se mění s rostoucí smykovou rychlostí. To je možno pozorovat na obr. 25

Tab. 27 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PET 10mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	10	PET	1,7360	2000	2135	92,2	92,2	1,00
2	10	PET	1,5620	1800	1916	79,3	85,5	0,93
3	10	PET	1,3020	1500	1590	70,3	75	0,94
4	10	PET	0,8680	1000	1049	55,9	55,4	1,01
5	10	PET	0,4340	500	516	33,6	32,3	1,04
6	10	PET	0,1736	200	203	15,2	15,1	1,01
7	10	PET	0,0868	100	100	7,4	8,2	0,91
8	10	PET	0,0434	50	49	4,3	4,4	0,98
9	10	PET	0,01736	20	19	2,0	1,8	1,09

Tab. 28 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PET 20mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	20	PET	1,7360	2000	2114	213,3	221,6	0,96
2	20	PET	1,5620	1800	1896	212,9	204,9	1,04
3	20	PET	1,3020	1500	1573	165,3	178,7	0,93
4	20	PET	0,8680	1000	1035	138,3	130	1,06
5	20	PET	0,4340	500	509	73,9	74	1,00
6	20	PET	0,1736	200	200	33,2	33,3	1,00
7	20	PET	0,0868	100	99	17,6	17,6	1,00
8	20	PET	0,0434	50	49	9,0	9,2	0,98
9	20	PET	0,01736	20	19	3,9	3,8	1,03

Tab. 29 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PET 30mm

Porovnání naměřených a vypočtených hodnot								
Měření	Tryska (mm)	Materiál	Rychlost pístu	Zdánlivá smyková rychlost (1/s)	Smyková rychlost (1/s)	Tlak měřený (bar)	Tlak (bar) APPARENT	Relativní podíl měřeného a vypočteného tlaku
1	30	PET	1,7360	2000	2249	337,2	346	0,97
2	30	PET	1,5620	1800	2008	313,4	325	0,96
3	30	PET	1,3020	1500	1651	288,8	291	0,99
4	30	PET	0,8680	1000	1069	222,7	226,3	0,98
5	30	PET	0,4340	500	513	134,0	132,3	1,01
6	30	PET	0,1736	200	199	61,4	60,2	1,02
7	30	PET	0,0868	100	98,6	32,0	31,6	1,01
8	30	PET	0,0434	50	49,1	16,0	16,2	0,99
9	30	PET	0,01736	20	19,06	6,6	6,6	1,01

I u PET materiálu se ukázalo, že nejhorší shoda je pro krátkou trysku, zatím co pro delší trysky je shoda dobrá. Hodnoty smykové rychlosti jsou jen nepatrně větší než hodnoty zdánlivé rychlosti, což indikuje, že lokální směrnice se blíží k 1, tudíž materiál má téměř newtonovské chování.

I když krátká tryska vykazuje nejhorší shodu i na ní jsou odchylky do 10% takže pro praktické účely i tato měření jsou akceptovatelná. Nicméně se ukazuje, že při měření na nejdelší trysce 30 mm je shoda mezi modelováním a měřením nejlepší, takže tuto trysku je možno doporučit pro měření viskozit materiálu.

## ZÁVĚR

Práce se skládá z experimentální části a modelování, které umožnilo ověřit kvalitu experimentu. V experimentální části byly naměřeny tokové křivky materiálu PVC, HDPE a PET s dost velkou přesností, jak ukazuje chyba fitování těchto viskozit pro model pro výpočet. U všech měřených křivek se ukazuje, že jsou závislé na délce kapiláry, přičemž závislost PVC a HDPE je podle očekávání. To znamená, že při delší trysce je viskozita nižší což je způsobeno tím, že na delší trysce se vytvoří větší tlakový spád což eliminuje napětí, který vznikne při přechodu z rezervoáru do kapiláry. U těchto materiálu je pro měření možné doporučit delší trysku, protože modelování ukázalo, že ohřev díky disipaci není vysoký a proto nám změna teploty nezkreslí naměřené hodnoty.

U PET materiálu je situace jiná zde je závislost viskozity na délce trysky opačná. Domníváme se, že pokud by se měla vybrat tryska pro měření viskozity pro určitý proces, měla by se vybrat tak, aby podíl  $L/R$  (délka a radius) trysky byl zhruba rovný poměru  $L/s$  (délka / velikost nejmenší štěrbin) na reálném zařízení.

Modelování ukázalo, že hodnoty naměřené na reometru poskytují viskozity, které se dají použít pro další modelování, protože jsme dostali hodnoty tlaku, ze kterých jsme vycházeli, což znamená, že ve viskozitě jsou podchyceny všechny jevy, které se v toku projevují a žádné z nich nebyly zanedbány.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] OSSWALD, Tim A. *Polymer processing fundamentals*. Hanser/Gardner Publications ,c1998
- [2] Brydson, J.A.: *Flow Properties of Polymer Melts*. London: The Plastics Institute, 1970.
- [3] Manfred H. Pahl, Wolfgang Gleissie, Detlef Linnemann, *Praktische Rheology der Kun ststoff schmelzen und Losungen*. Dusseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1983.
- [4] Prentice, P.: *Rheology and its Role in Plastics Processing*. Rapra Review Reports. Report 84. Shawbury, Rapra Technology Limited, 1995.
- [5] Rosen, M.R.: *Polymer Plastics Techn. and Engn.*, 12, č.1, 1979.
- [6] Ulbrech, J., Mitschka, P.: *Chemické inženýrství nenevtonovských kapalin*. Praha. Nakladatelství československé akademie ved, 1965.
- [7] Agasant a j.: *Polymer Processing. Principles and Modelling*, Hanser Publishing. 1991
- [8] Osswald: *Polymer processing. Modeling and Simulation*. Hanser.2006
- [9] *Compuplast: User's manual for 2DFEM*

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

<b>A</b>	Plocha
<b>F</b>	Působící síla
$\dot{\gamma}$	Smyková rychlost
$\gamma$	Smyková deformace
$\tau$	Smykové napětí
<b>D</b>	Smyková viskozita
<b>M</b>	Index konzistence
<b>Q</b>	Objemový průtok
$\rho$	Hustota
<b>C<sub>p</sub></b>	Tepelná kapacita taveniny
<b>D</b>	Disipovaná energie
<b>PVC</b>	Polyvinylchlorid
<b>HDPE</b>	Vysokohustotní polyetylén
<b>PET</b>	Polyetyltereftalát

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1. Rozdělení polymerů.....	12
Obr. 2. Monomer ethylenu.....	15
Obr. 3. Molekula polyethylenu .....	16
Obr. 4. Symbolické zobrazení molekuly polyethylenu.....	16
Obr. 5. Symbolické zobrazení kondenzační polymerace polyamidu.....	17
Obr. 6. Rozložení molekulové hmotnosti u běžného termoplastu.....	18
Obr. 7. Vliv molekulové hmotnosti na mech. vlastnostech .....	18
Obr. 8. Schéma molekulové struktury různých polyethylenů .....	19
Obr. 9. Schéma rozdělení termoplastů.....	20
Obr. 10. Schéma molekulové struktury a uspořádání typ. polykrystalických materiálů.....	22
Obr. 11. Modul pružnosti ve smyku HDPE v závislosti na teplotě.....	23
Obr. 12. Schéma posuvné desky reometru .....	32
Obr. 13. Snížená viskozitní křivka LDPE při 150° C.....	34
Obr. 14. Průběh viskozity pseudopastické polymerní taveniny.....	35
Obr. 15. Rychlostní tokový profil v kapiláře.....	39
Obr. 16. Tlakový profil modelu .....	45
Obr. 17. Zesíťovaný model.....	45
Obr. 18 Kapilární reometr Göttfert rheograph 2001 .....	49
Obr. 19 Úvodní nastavení materiálů .....	59
Obr. 20 Zadání měřených viskozitních dat.....	60
Obr. 21 Výběr modelu .....	61
Obr. 22 Porovnání vypočtené křivky z modelů a měřených dat pro PVC a délku kapiláry 10 mm. Chyba fitování 1,954 % .....	61
Obr. 23 Porovnání vypočtené křivky z modelů a měřených dat pro HDPE a délku kapiláry 10 mm Chyba fitování 1,967 % .....	62
Obr. 24 Porovnání vypočtené křivky z modelů a měřených dat pro PET a délku kapiláry 10 mm. Chyba fitování 4,339 % .....	62
Obr. 25 Materiálová viskozita včetně Rabinowitschovy korekce .....	63
Obr. 26 Tvorba geometrie.....	64
Obr. 27 Síť použita pro řešení.....	65
Obr. 28 Hranice tokové domény .....	67

---

Obr. 29 Projektová editace.....	68
Obr. 30 Tlakové pole na tokové doméně a rychlostní a teplotní profil na řezu před výstupem z kapiláry.....	69
Obr. 31 Tlakové pole na tokové doméně a průběh rychlosti a teploty během toku částice tokovou doménou. ....	70
Obr. 32 Tlakový profil v tokové doméně ve 3D tvaru.....	71



**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1. Nejčastější polymery a jejich použití.....	14
Tab. 2. Indexy mocninová zákona, pro běžné termoplasty .....	36
Tab. 3 Naměřené hodnoty PVC s tryskou 10 mm na kap. reometru .....	51
Tab. 4 Naměřené hodnoty PVC s tryskou 20 mm na kap. reometru .....	51
Tab. 5 Naměřené hodnoty PVC s tryskou 30 mm na kap. reometru .....	52
Tab. 6 Naměřené hodnoty HDPE s tryskou 10 mm na kap. reometru .....	52
Tab. 7 Naměřené hodnoty HDPE s tryskou 20 mm na kap. reometru .....	53
Tab. 8 Naměřené hodnoty HDPE s tryskou 30 mm na kap. reometru .....	53
Tab. 9 Naměřené hodnoty PET s tryskou 10 mm na kap. reometru.....	54
Tab. 10 Naměřené hodnoty PET s tryskou 20 mm na kap. reometru.....	54
Tab. 11 Naměřené hodnoty PET s tryskou 30 mm na kap. reometru.....	55
Tab. 12 Namodelované hodnoty PVC s tryskou 10 mm .....	73
Tab. 13 Namodelované hodnoty PVC s tryskou 20 mm .....	73
Tab. 14 Namodelované hodnoty PVC s tryskou 30 mm .....	74
Tab. 15 Namodelované hodnoty HDPE s tryskou 10 mm.....	74
Tab. 16 Namodelované hodnoty HDPE s tryskou 20 mm.....	75
Tab. 17 Namodelované hodnoty HDPE s tryskou 30 mm.....	75
Tab. 18 Namodelované hodnoty PET s tryskou 10 mm.....	76
Tab. 19 Namodelované hodnoty PET s tryskou 20 mm.....	76
Tab. 20 Namodelované hodnoty PET s tryskou 30 mm.....	77
Tab. 21 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PVC 10mm.....	78
Tab. 22 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PVC 20mm.....	79
Tab. 23 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PVC 30mm.....	79
Tab. 24 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro HDPE 10mm.....	80
Tab. 25 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro HDPE 20mm.....	81
Tab. 26 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro HDPE 30mm.....	81
Tab. 27 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PET 10mm .....	82
Tab. 28 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PET 20mm .....	82
Tab. 29 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro PET 30mm .....	83

**SEZNAM GRAFŮ**

Graf 1. Členění polymerní produkce v USA. ....	12
Graf 2. Členění polymerní produkce v USA. ....	13
Graf 3 Závislost zdánlivé viskozity na zdánlivé smykové rychlosti u PVC.....	56
Graf 4 Závislost zdánlivé viskozity na zdánlivé smykové rychlosti u HDPE.....	57
Graf 5 Závislost zdánlivé viskozity na zdánlivé smykové rychlosti u PET. ....	58

**SEZNAM ROVNIC**

$\gamma = dv(xy)dy$ (1).....	29
$\gamma = d\gamma dt$ (2).....	30
$\gamma = \gamma * dt$ (3).....	30
$\tau = FA$ (4).....	30
$\eta = \tau\gamma$ (5).....	30
$\tau xy = \eta T, \gamma\gamma xy$ (6).....	32
$\tau = K.\gamma n$ (7).....	35
$\log \tau = \log K + n \log \gamma$ (8).....	35
$\eta = m(T)\gamma n - 1$ (9).....	36
$m(T)=m_0e - a(T - T_0)$ (10).....	36
$\tau = R.p2.L$ (11).....	37
$\gamma = 4.Q\pi.R3$ (12).....	37
$\gamma = 4Q\pi R3 3n + 14n$ (13).....	37
$n = d\log\tau d\log\gamma$ (14).....	38
$\sum_{j=1}^{j=3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \eta \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0$ (15).....	41
$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$ (16).....	41
$\eta = f\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right)$ (17).....	41
$\sum_{j=1}^{j=3} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \sum_{j=1}^{j=3} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial x_j} v_j + D$ (18).....	42
$\eta = f\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}, T\right)$ (19).....	42
$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{v_{n+1} - v_{n-1}}{2\Delta x}$ (20).....	43



