

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ
TECHNIKY

NÁVRH EXTRUDÉRU
DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

David Ježek

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Praze dne

.....

Jméno a Příjmení

Anotační list

Jméno autora: David

Příjmení autora: Ježek

Název práce česky: Návrh extrudéru

Název práce anglicky: Extruder design

Rozsah práce:
počet stran: 61
počet obrázků: 38
počet tabulek: 11
počet příloh: 5

Akademický rok: 2018/2019

Jazyk práce: čeština

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

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

Oponent: Ing. Jiří Moravec, Ph.D.

Anotace česky:

V této práci jsou popsány procesy vytlačování materiálu včetně strojů a komponent, které jsou k tomu určeny. Práce se také zaměřuje na zjednodušený návrh a výpočet nejdůležitějších komponent vytlačovacího stroje, kterým je šnek a vytlačovací hlava. V poslední části práce jsou vyhodnoceny reologické vlastnosti materiálu z naměřených hodnot, které poskytl vytlačovací stroj.

Anotace anglicky:

In this thesis extrusion processes including extruders and their components are described. The task of this work also was design and calculation of extruder and its main components like screw and extrusion head. In last chepter rheological properties of the TPE are evaluted, which was measured on extruder.

Klíčová slova:

Vytlačovací stroj, šnek, vytlačovací hlava

Obsah

Úvod.....	7
1 Extruze, vytlačování plastů	8
1.1 Proces vytlačování plastů	8
1.2 Granulace	9
2 Vytlačovací stroj.....	11
2.1 Jednošnekový vytlačovací stroj	11
2.1.1 Šnek vytlačovacího stroje	12
2.1.2 Hlava vytlačovacího stroje	13
2.1.2.1 Přímá vytlačovací hlava.....	14
2.1.2.2 Nepřímá vytlačovací hlava	15
2.1.2.3 Širokoštěrbinové hlavy.....	16
2.1.2.4 Speciální hlavy.....	17
2.2 Dvoušnekový vytlačovací stroj.....	18
2.3 Operační parametry	19
2.4 Dílčí závěr kapitoly	22
3 Návrh extrudéru	23
3.1 Extrudér od firmy POTOP	23
3.2 Extrudér od firmy BOCO	24
3.3 Dílčí závěr kapitoly	25
4 Návrh šneku extrudéru.....	26
4.1 Předpoklad izotermního chování.....	27
4.2 Předpoklad adiabatického chování.....	32
4.3 Dílčí závěr kapitoly	34
5 Návrh hlavy extrudéru	35
5.1 Kuželová hlava	35
5.2 Hlava s minimálním průměrem	36
5.3 Hlava s větším průměrem	37
5.3.1 Pevnostní výpočet.....	38
5.3.2 Tepelné ztráty hlavy.....	40
5.3.3 Návrh kapiláry.....	42
5.3.3.1 Smyková rychlost.....	43
5.3.3.2 Tečné napětí.....	43
5.3.3.3 Tlaková ztráta.....	43
5.4 Dílčí závěr kapitoly	50
6 Reologické měření na extrudéru	51
6.1 Dílčí závěr kapitoly	54

6.2 Použité přístroje	55
Závěr.....	56
Seznam použitých symbolů.....	57
Použité zdroje a literatura.....	59
Seznam příloh.....	61

Úvod

Práce je zaměřená na proces výrobního vytlačování polymerů a používané zpracovatelské stroje. Pro požadované parametry výrobního procesu je potřeba navrhnout vhodný stroj. Pravděpodobně se bude jednat o selekci vhodného stroje z katalogových listů výrobců. Pro zvolený materiál se provede kontrolní výpočet šneku. Navrhovaný extrudér bude sloužit k analýze tokových vlastností tavenin různých druhů polymerů. Pro tento záměr je nutné navrhnout měřící hlavu. Je potřeba vytvořit několik koncepčních návrhů, z nichž nejlepší bude rozpracován a analyzován z hlediska toku materiálu např., CFD nástrojem, dále bude proveden pevnostní výpočet spojovacích součástí hlavy a výpočet tepelných ztrát. Výsledky práce mají posloužit jako podklad pro výběrové řízení pro nákup extrudéru jako nové vybavení laboratoří univerzity. Nad rámec zadání práce je plánováno zprovoznění stroje a provedení prvotních testů na reologické hlavě pro zvolený materiál včetně vyhodnocení reologických vlastností tohoto materiálu. Tato plánovaná práce navíc, ale bude závislá na včasném dodání stroje v rámci času vymezeného pro vypracování této diplomové práce.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Janu Skočilasovi Ph.D., jelikož mi pomohl upřesnit věci týkající se této práce. Dále za poskytnutí věcných konzultací a v neposlední řadě za možnost být u zprovoznění extrudéru ve školním prostředí a provedení prvního měření na tomto stroji.

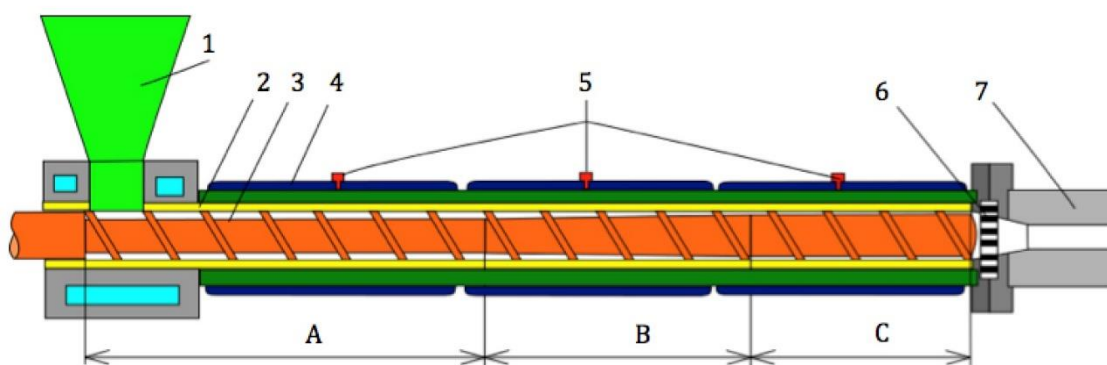
1 Extruze, vytlačování plastů

První část práce je věnovaná literární rešerši zaměřené na pochopení a popisu procesů a podstaty extruze polymerů. Dále je zde popsán princip fungování stroje, rozdělení strojů a důležitých periferií nutných k provozu stroje pro daný účel (především hlav) a pro daný typ materiálu.

Název extrudér vychází z anglického slovíčka extrusion nebo-li vytlačování. Extrudér se tedy používá k výrobě vytlačovaných výrobků standardně stejného průřezu v mnoha výrobních odvětvích. Jedná se o kontinuální proces. V potravinářském průmyslu například k výrobě cereálií nebo těstovin. Ve spotřebním průmyslu k výrobě krmiv, léčiv, mýdla, keramiky. Dále ve strojním oboru se využívá v metalurgii. Co je důležité, používá se také velmi často pro zpracování plastů. Na extrudér zpracovávající plasty, konkrétně na výrobu granulátu plastů je zaměřena tato diplomová práce.

1.1 Proces vytlačování plastů

Pro lepší porozumění procesu vytlačování si nejprve popíšeme samotný vytlačovací stroj. Pro vstup zpracovávaného materiálu do stroje je na začátku umístěna násypka. Hlavní část stroje je tvořena válcovou dutinou, ve které je umístěná hřídel se šroubovicí. Tvar a rozteč šroubovice je odlišná pro konkrétní zpracovávaný materiál. Rozteč bývá po délce hřídele nekonstantní z důvodu co nejlepšího natavení a promíchání. Stejně tak průměr hřídele z důvodu dosažení potřebného tlaku v tavenině. Této části stroje se říká šnek. Tělo stroje je obklopeno elektrickými topnými tělesy, které mají za úkol ve všech částech stroje směs natavit a udržovat v tekutém stavu. Kontrola teploty topných těles je prováděna termočlánky. Ještě než materiál získá svoji finální podobu, tak projde přes tzv. lamač. Lamač je obvykle děrovaný plech, který drží síto pro zachytávání nečistot a taveninu ještě více homogenizuje. Posledním prvkem základního stroje pro vytlačování je už jen vytlačovací hlava. Ta udává materiálu konečný tvar, díky svému průřezu. Za hlavou obvykle bývá ochlazovací část a řezání. [3]



Obr. 1 Schéma vytlačovacího stroje: 1 – násypka, 2 – válcová komora, 3 – šnek, 4 – topná tělesa, 5 – termočlánky, 6 – lamač, 7 – vytlačovací hlava [3]

Z hlediska procesu se stroj dá rozdělit na 3 hlavní části. První částí je část vstupní. Na začátku procesu se nasypkou do stroje přivede požadovaná směs látek se všemi přísadami. Materiál může být přiváděn též pneumaticky ze zásobníku. Úkolem této části je materiál přehřát a dopravit do druhé části zvané plastifikační. V té je materiál stlačován, intenzivně zahříván a postupně přechází do plastického stavu. Proto se této části také říká přechodová nebo kompresní. Poslední ze tří sekcí je část výstupní. Ta má za úkol natavit zbylý nenatavený materiál, dosáhnout požadovaného tlaku a získat homogenní taveninu. Homogenitu připravované taveniny zajišťuje otáčení šroubovice na šneku, případně mohou být na šneku umístěny homogenizační sekce. Roztavený plast poté putuje přes lamač, kde jsou zachytávány nečistoty až do vytlačovací hlavy, kde dostává výrobek svůj konečný tvar. [1]

1.2 Granulace

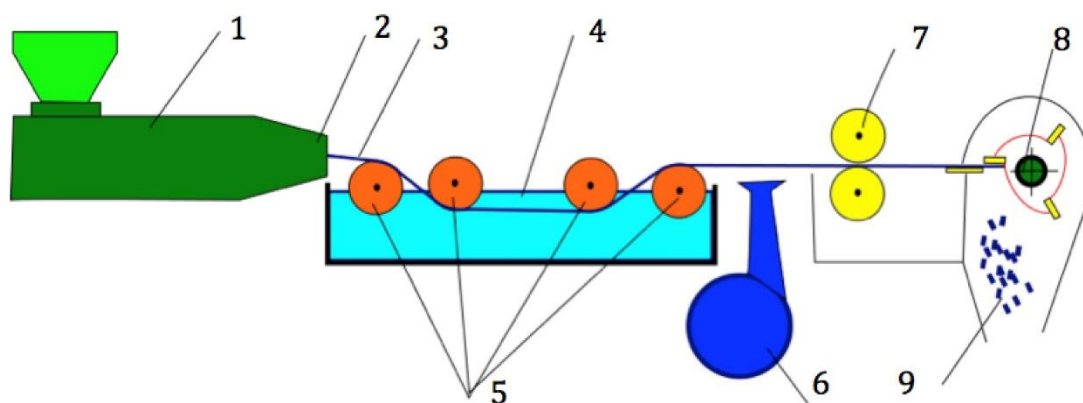
Granulace je způsob úpravy polymerních materiálů ke konečnému zpracování. Granulací se rozumí výroba pevných stejně velkých částic obvykle v rozměrech jednotek milimetrů. Používá se pak pro plnění násypky vytlačovacích a vstřikovacích strojů. Výhodou takto připravené polymerní látky je, že se nelepí tolika na stěny strojů zpracovávající tento materiál na rozdíl od práškových směsí. Snazší dávkování, přimíchávání různých přísad a barviv jsou dalšími nespornými výhodami a vlastně důvody proč dochází k této úpravě.

Existují dva způsoby, jak plastový granulát vytlačovacím strojem vyrobit. Prvním je takzvaná granulace za tepla. Kdy hned za vytlačovací hlavou je nožový systém, který hned odřezává protlačený materiál a vytváří tak granule. Takto to bývá i při výrobě těstovin. Výrobní rozsah takových strojů bývá od několika kilogramu do 25 tun za hodinu. [3]



Obr. 2 Granulace na vytlačovací hlavě [3]

Druhou možností je vytvořit nejprve strunu plastu, která je následně nasekána. Při výrobě struny dochází za vytlačovací hlavou k jejímu zchlazení. Nejčastěji vodní lázní. Za vodní lázní může být ventilátor, který zbavuje strunu vody a povrch vysouší. Poté již jen struna putuje pomocí podávacích válečků do nožového granulátoru, kde je struna nasekána na granule tvaru válečků. Schematicky je dobře vidět na obrázku 3.



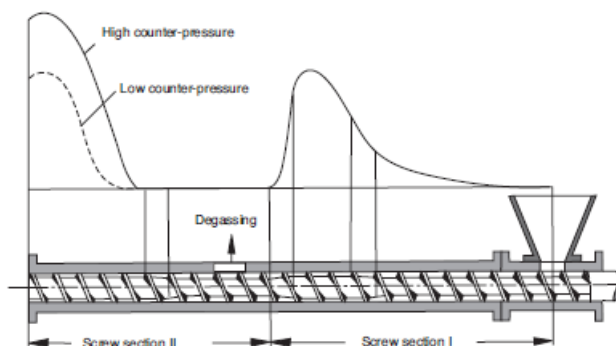
Obr. 3 Granulace za studena: 1 – vytlačovací stroj, 2 – vytlačovací hlava, 3 – struna plastu, 4 – chladicí lázeň, 5 – vodící válečky, 6 – ventilátor, 7 – podávací válečky, 8 – nožový granulátor, 9 – granule [3]

2 Vytlačovací stroj

V první kapitole je již popsáno, z jakých částí se vytlačovací stroj skládá. V této kapitole si rozebereme stroj detailněji. Obecně se dá typ vytlačovacího stroje rozdělit na jednošnekový nebo dvoušnekový. Historicky se používal stroj pístový, který ale v dnešní době je používán pouze zřídka. Jednošnekový vytlačovací stroj je řekněme základním strojem pro účely vytlačování výrobku. Nicméně toto zařízení nebo jeho prvky se objevují v další technologiích zpracovávající polymerní materiály. Například vstřikovací stroj se liší jenom tím, že na svém konci má místo vytlačovací hlavy vstřikovací trysku a šnek stroje se při vstřikování pohybuje. Jinak je to v zásadě stejný stroj.

Vraťme se k vytlačování. Pokud nejsou velké požadavky na míchací účinek a jsou používány základní materiály s dobrými reologickými vlastnostmi, bohatě postačí stroj jednošnekový. Jeho další předností na rozdíl od stroje se dvěma šnekami je jeho pravidelnost výtoku taveniny z vytlačovací hlavy. Proto se ve velké míře používají pro vytlačování trubek a profilů větších délek. Lepší míchání se u dvoušnekového stroje se využívá hlavně pro rozmíchání regenerátu, neměkčeného PVC a materiály získávané z několika složek. Příkladem mohou být právě směsi PVC. [1]

V některých případech je potřeba zajistit, aby měl stroj tzv. odplyňovací zónu. Stroj bez této funkce odplynění taveniny a hladkým povrchem dutiny se nazývá konvenční vytlačovací stroj. Stroji s touto funkcí se říká drážkový vytlačovací stroj nebo také nekonvenční vytlačovací stroj. Ten svými otvory v plášti dutiny zajišťuje odvod například vlhkosti z taveniny, ale i jiných inertních plynů.

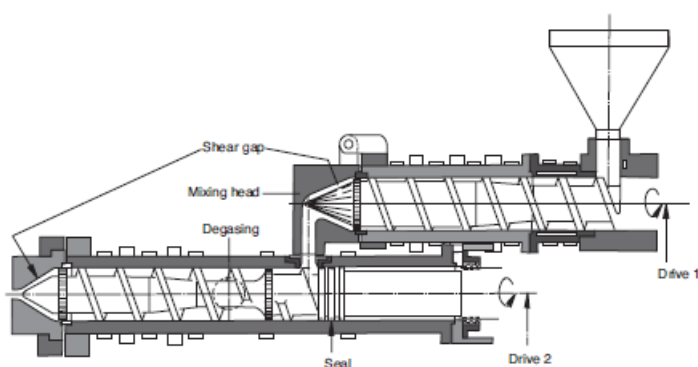


Obr. 4: Schéma vytlačovacího stroje s odplyňováním – (high counter pressure – vysoký protitlak, low counter-pressure – nízký protitlak, degassing – odplynění, screw section I – šneková sekce 1, screw section II – šneková sekce 2) [2]

2.1 Jednošnekový vytlačovací stroj

Princip šnekových vytlačovacích strojů je založen na tlakovém gradientu. Cílem je tedy dosáhnout optimálního tlaku na konci vytlačovacího stroje před vytlačovací hlavou. Ten je vytvářen třením materiálu o vnitřní stranu dutiny a tlačení materiálu šroubovicí směrem vpřed. Toto všechno zajišťuje tvar a rozměry šneku.

Pro zlepšení tvorby taveniny se vytvořil kaskádový stroj. Je to vlastně stroj se dvěma šnekami, ale nikoliv paralelně řazenými, ale sériově za sebou. Obvykle je totiž jako dvoušnekový stroj označován ten s dvěma paralelně řazenými šnekami. Kaskádový stroj, má ale odlišný postup výroby. Jsou to vlastně dva jednošnekové stroje za sebou, kde v prvním dochází k tvorbě taveniny a ve druhém se dosahuje promíchání a potřebného tlaku. Výhodou této konfigurace je, že každý šnek má svoji pohonnou jednotku. Jde tedy ovládat rychlost otáčení na každém ze strojů a docílit tak toho nejlepšího výtoku taveniny.



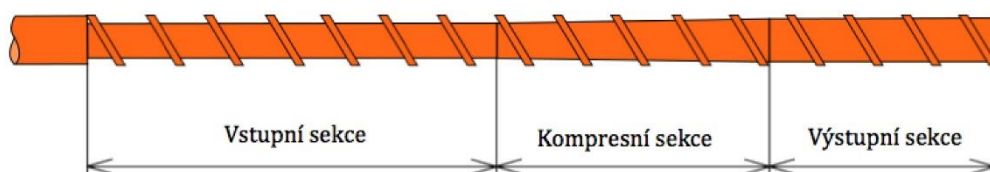
Obr. 5: Kaskádový vytlačovací stroj – (Shear gap – smyková mezera, mixing head – směšovací hlavice, degasing – odplynění, seal – těsnění, drive 1 – pohon 1, drive 2 – pohon 2) [2]

2.1.1 Šnek vytlačovacího stroje

Hřídel se specifickou šroubovicí je nejen svou polohou vlastně jádro celého stroje. Odvíjí se od ní provozní podmínky, zpracovávaný materiál, a tudíž možnost vyrábění výrobků z daného materiálu. Do provozních podmínek samozřejmě výrazně zasahuje vytlačovací hlava a její konkrétní průřez pro daný výrobek. O té ale až později.

Jelikož vytlačováním se kvůli filozofii technologie zpracovávají nejběžněji termoplasty případně elastomery, popíšeme si typický šnek pro vytlačování termoplastů. Dá se podobně jako stroj rozdělit na 3 zóny podle jejich funkce.

V první zóně je materiál dopravován do dalších sekcí. Je zde proto obvykle větší rozteč šroubovice a menší průměr hřídele než v následujících zónách. Je-li na šneku takto proměnná rozteč nebo proměnný průměr jedná se o šnek diferenciální. Cílem obou těchto konstrukčních úprav je dosažení komprese, a proto se obvykle u těchto šneků na základě poměru rozměrů na vstupu a na výstupu udává kompresní poměr.



Obr. 6 Schéma šneku vytlačovacího stroje [3]

Druhá zóna je tzv. kompresní. V této zóně se právě mění průměr jádra a materiál je tak stlačován v důsledku otáčení šneku. Dalším důsledkem otáčení šneku je tření materiálu o stěny dutiny stroje, což zapříčiňuje další proces ohřevu materiálu po ohřevu topnými tělesy, kterými je stroj obklopen.

Výstupní sekce je poslední částí šneku. V té se dosahuje potřebného tlaku pro vytlačování a dokončování procesu plastifikace a homogenizace. V této části je zpravidla průměr jádra největší, tedy hloubka drážky v rozteči šroubovice nejmenší tak, aby se udržel potřebný tlak. Na rozdíl od šneků pro vstřikovací stroje, kde šnek funguje i jako píst, nemá špička šneku nějakou zvláštní funkci. Nemusí být tedy nijak tvarově upravovaná, jak můžeme vidět na obrázku 6. Můžou se ale vyskytovat různé mísící sekce, které jsou přidávány zejména, kdy se k plastu přidávají různá barviva, skelná vlákna, minerální prášky či různé další příměsi. Příklady takovýchto sekcí můžeme vidět na obrázku Obr. 7.



Obr. 7 Mísící sekce šneku [3]

Uložení šneku si můžeme představit jako vetknutý hřídel. Na jedné straně šneku je šnek spojený přes spojku s elektromotorem a na druhé straně je volně uložený ve směšovací hlavici.

2.1.2 Hlava vytlačovacího stroje

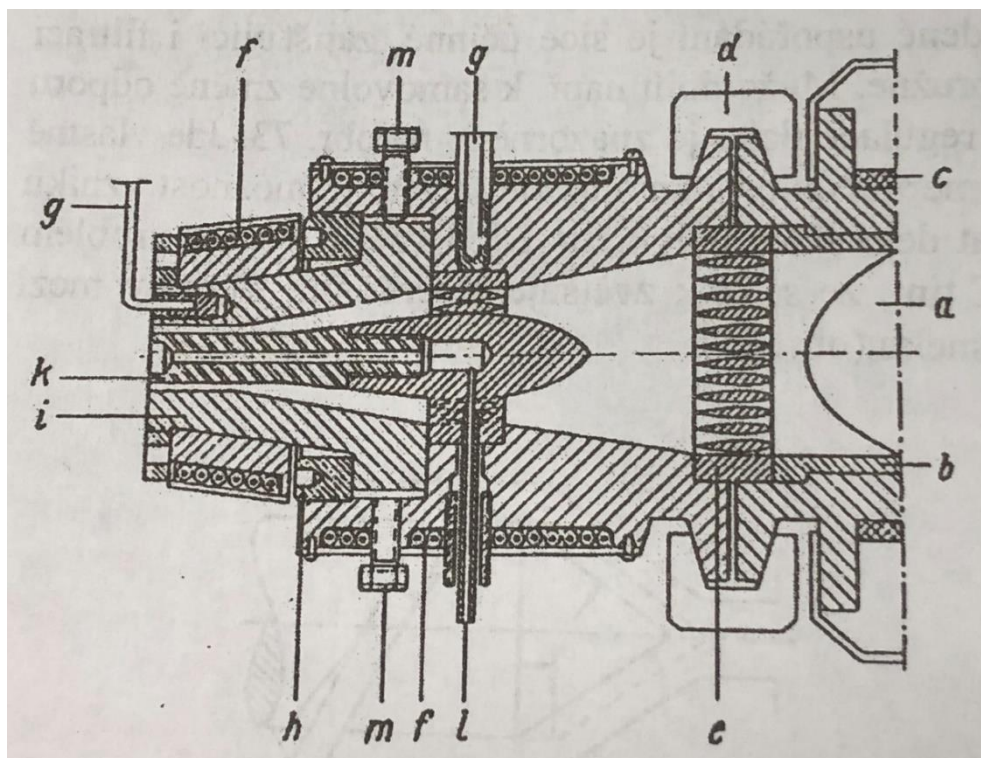
Druhá součást, která má výrazný vliv na provozní parametry stroje je vytlačovací hlava. Ta zpravidla udává výrobku konečný tvar průřezu. Průřez otvoru ve vytlačovací hlavě je uzpůsoben finálnímu průřezu výrobku. Nejen šnek, ale i konstrukce vytlačovací hlavy závisí na zpracovávaném materiálu a jeho neneutonských vlastnostech. Není tedy univerzální vytlačovací hlava pro jeden průřez a všechny typy polymerů, protože je potřeba zajistit rovnoměrný a trvalý tok materiálu. Obecně se dají vytlačovací hlavy zařadit do kategorií podle toho jaký výrobek vytvářejí. Nejčastějšími výrobky vytlačování jsou plastové desky, tyče, trubky, válcové filmy pro tašky nebo fólie, struny či vlákna. Hlavy můžeme dělit podle jejich konstrukce do skupin na hlavy [1]:

- *přímé* – typické pro trubky, tyče, struny
- *nepřímé* – nepřímý vtok taveniny, např. pro opláštění vodičů nebo vyfukování folií
- *širokoštěrbinové* – využití najdou ve výrobě desek nebo folií
- *speciální* – např. pro výrobu sítí a vícevrstevných výrobků

2.1.2.1 Přímá vytlačovací hlava

Hlava pro vytlačování strun, ze kterých se vyrábí granule je přímá. To znamená, že poloha osy šneku je stejná jako poloha osy hlavy. Na obrázku 8 je vyobrazena přímá hlava pro vytlačování trubek, kde se výměnou hubice a trnu dají vytvářet trubky různých průměrů. Takto by mohla vypadat i hlava na výrobu strun, kdyby byl v hlavě nebyl trn a byl zajištěn výkon pro daný průměr struny. Ostatně často to tako bývá řešeno, že jsou výměnné vytlačovací hubice.

Pro stálost výrobků je důležité, aby byla zajištěna dostatečná délka hubice. To proto, protože zde tavenina zbavuje vnitřního napětí tzv. relaxuje. Další možností dosažení stálosti výrobku je posunutím hubice směrem k ose hlavy a vytvořením tak rovnoměrné tloušťky profilu bez propadlin. Obecně je totiž potřeba počítat s objemovou kontrakcí polymerů za vytlačovací hlavou a konstruktér, který vymýšlí vytlačovací hlavu si toho musí být vědom. Je tedy zřejmé, že konstrukce hlavy vzhledem k tomu, že se pracuje s polymerními látkami, je z velké části záležitostí zkušeností.



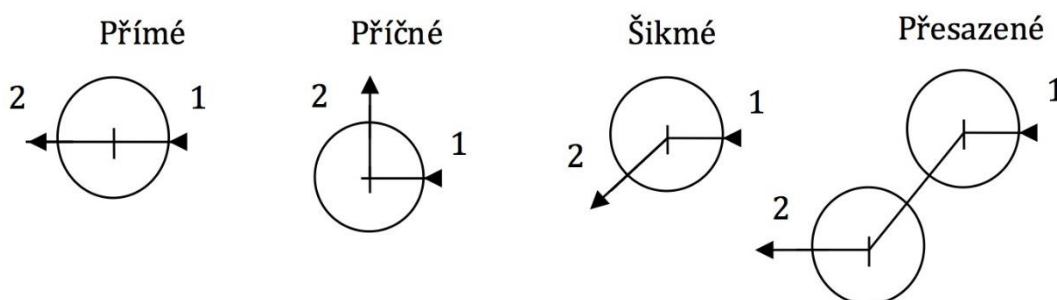
Obr. 8 Přímá vytlačovací hlava: a - šnek, b - pouzdro, c - vytápění, d - objímka, e - lamač, f - vytápění, g - termočlánek, h - uchycení hubice, i - hubice, k - dutý trn, l - přívod tlakového vzduchu, m - stavěcí šrouby [4]

U jednoduchých průřezu profilů a obvykle pro nějakou menší nesériovou výrobu lze samozřejmě kýžený profil vyfrézovat do desky, která se přimontuje k hlavě a plní funkci hubice. Něco podobného můžeme vidět na obrázku Obr. 2, kde jsou na násobné vytlačovací hlavě odřezávány granule. S výhodou se zde využívá plochy desky pro více otvorů a odřezávání výrobku na ní. Přičemž až tolika nezáleží na konečném tvaru výrobku a průřez výrobku je velmi jednoduchý. Takto zhotovené vytlačovací hlavy jsou oproti běžným

hlavám samozřejmě velmi levné. Je to ale za cenu nerovnoměrnosti toku taveniny a je potřeba zvážit, jestli pak bude finální výrobek splňovat požadavky kvality, což například u granulí vytvářených za hlavou bude ve většině případů splňovat. [4]

2.1.2.2 Nepřímá vytlačovací hlava

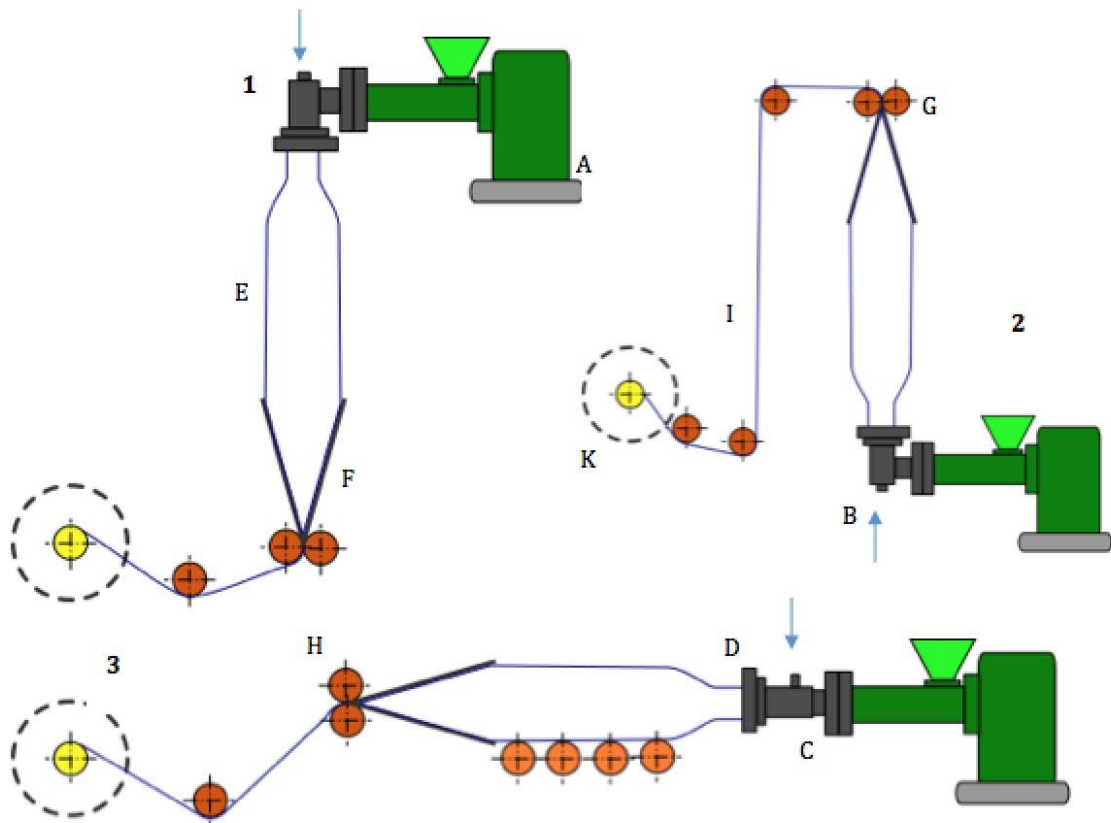
Rozdílem nepřímé hlavy od přímé je, že osa šneku je v jakékoliv jiné poloze jen ne v stejné s osou hlavy. Nepřímé hlavy můžou být tedy příčné, šikmé, přesazené. Vyobrazení jednotlivých směrů toku taveniny můžeme vidět na obrázku Obr. 9.



Obr. 9 Typy poloh vytlačovacích hlav vůči šneku: 1 - osa šneku, 2 - osa hubice [3]

Podmínky pro konstruování jsou pro všechny hlavy stejné. Dosáhnout rovnoměrného průtoku a brát v úvahu stlačitelnost taveniny plastu. U nepřímých hlav, ale nastává problém se změnou směru toku taveniny, který je potřeba brát v potaz. Čím větší je sklon os obou toků tím větší nastávají problémy s nerovnoměrným tokem taveniny. V ohybu taveniny totiž dochází k deformacím, které je nutné řešit. Jedním z řešení je udělat díry rozdílných průměrů na lamači, a to tím způsobem, že u vnitřní strany ohybu budou menší díry, a tudíž větší odpor proti tečení a u vnější strany naopak.

Jak již je uvedeno u rozdělení vytlačovacích hlav, tak toto uspořádání os důležitých součástí vytlačovacího stroje se používá především u opláštění vodičů a vyfukování fólií. Důvod, proč je nepřímá hlava u opláštění je ten, že nemusí být kabel veden šnekem. Stačí mít navrtaný trn, kterým opláštěvaný kabel povede a zneprimit tok taveniny. Mnohem složitější problém nastává u fólií. Je kladen důraz na rovnoměrnost vytékání taveniny a její tloušťky. Tomu v tomto případě napomáhá tlakový vzduch, který je přiváděn skrz dutý trn. Pro tento případ výroby se používá také hlava se spirálovým trnem, ale ta svým uspořádáním se řadí do hlav přímých. [4]

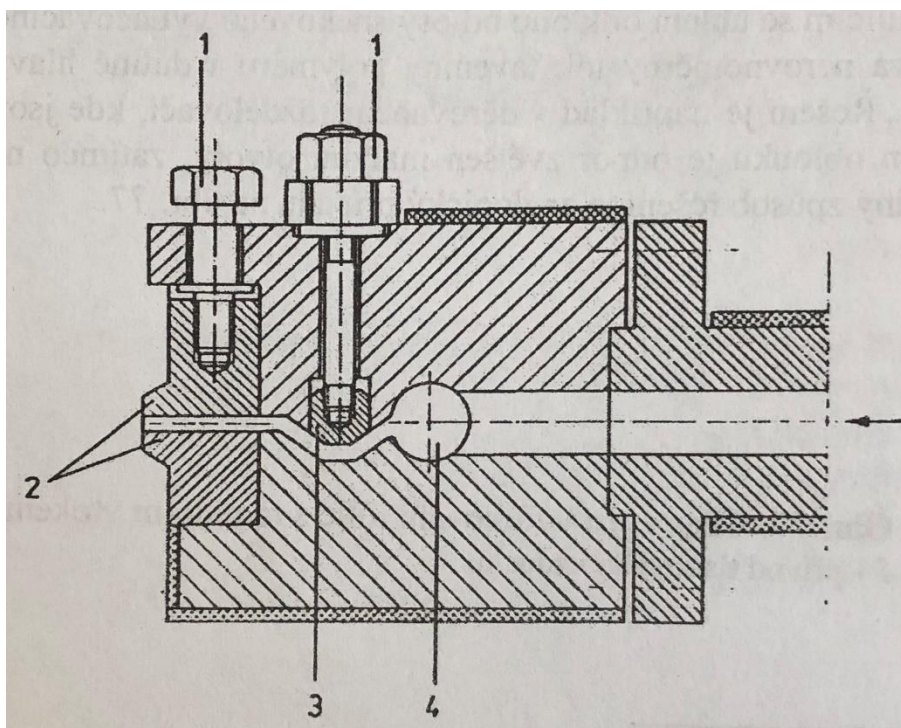


Obr. 10: Linka na vytlačování fólie (1-horní odtah, 2-spodní odtah, 3-horizontální odtah, A - extrudér, B - přívod vzduchu, C- vyfukovací hlava, D- chlazení, E - plastová hadice, F - vodící plechy, G - stlačovací válce, I - na dvakrát složená fólie, K - zařízení s napínacím válcem) [3]

2.1.2.3 Širokoštěbinové hlavy

Jak už napovídá název hlavy, tak tímto způsobem jsou vyráběny výrobky velkých šířek. Těmi jsou především desky a znovu fólie, což je vlastně deska s velmi malou tloušťkou. Při konstrukci hlavy na tento způsob zpracování plastů nastává jeden důležitý problém a tím je rovnoměrná distribuce taveniny po celé šířce výrobku. Základními prvky takové hlavy jsou:

- Rozvodný kanál
- Stavěcí šrouby
- Tvářecí lišty



Obr. 11 Širokoštěrbinová hlava: 1 – stavěcí šrouby, 2 – tvářecí lišty, 3 – brzdný můstek, 4 – příčný rozvodný kanál [4]

Tvar rozvodného kanálu pak určuje zmíněnou distribuci. Pro regulaci toku taveniny ze štěrbin jsou zde stavěcí šrouby, kterými lze přiškrcením střední části hlavy tok zrovnoměnit. Nicméně znovu platí, že není jedna vytlačovací hlava pro všechny polymerní materiály. V některých případech pomůže změna průřezu kanálu, jindy se musí použít jiný typ hlavy. U širokoštěrbinové hlavy, kterou můžeme vidět na obrázku může dojít ke vzniku mrtvých prostorů. V takové případě se často volí hlava ve tvaru rybího ocasu, kde je v rozvodném kanálu lépe rozložený tlak. Posledním dolaďovacím prvkem je místní vytápění hlavy, které rovněž přispívá k lepšímu toku taveniny. [4]

2.1.2.4 Speciální hlavy

Koncepce vytlačovacích hlav pro speciální účely je stejná jako u předchozích hlav. Často bývá změnou jenom úprava nějakého prvku nebo jeho funkce. Příkladem může být hlava pro vytlačování sítí nebo střížná hlava.

V případě výroby plastových sítí, jde o to, že do hubice i do trnu jsou obrobena půlkruhové zářezy. Oběma skupinami zářezů se vytlačuje plast. Trn a hubice se vůči sobě neustále otáčejí. K zesíťování dochází tehdy, kdy se oba zářezy otočí nad sebe a proud z hubice se spojí s proudem z trnu.

Střížná hlava na rozdíl o hlavy pro vytlačování sítí může být použita v několika aplikacích. Zvláštnost této hlavy spočívá v tom, že má rotující trn. Vlivem rotace trnu a vzniku smykových napětí ve štěrbině dochází k ohřevu taveniny. Teplota lze velmi dobře regulovat změnou otáček trnu. Díky tomu se dá dosáhnout vysoké teploty, čehož se využívá u zpracování kaučuků s následnou kontinuální vulkanizací za hlavou. Vulkanizace za hlavou má tu

výhodu, že výrobek je tvarově stabilnější při jeho odtahování. Mimo vulkanizaci se otáčení trnu využívá i pro napěňované materiály. Zde se nastavením otáček, a tudíž teploty, dá řídit průběh napěňování. Jelikož tímto způsobem dochází k ohřevu až těsně před tvarováním daného výrobku, tak se této funkce s výhodou využívá u tepelně citlivých polymerních materiálů, které jsou hned za vytlačovací hlavou zase zchlazeny. Dále se vysoké teploty taveniny před vytlačovací hlavou využívá při vytlačování tvarově složitějších výrobků. Tavenina je z důvodu vysoké teploty viskóznější a tím pádem lépe vyplní i složitější průřezy hlavy. Krom tepelných efektů otočného trnu se využívá také jiné vlastnosti. Tou je směr toku taveniny ve štěrbině. Využívá se kolmosti, které dává trn toku, při výrobě trubek. Do směsi, která je ve stroji roztavena, se přidává vláknité plnivo, které je trnem usměrněné do kolmého směru na směr vytlačování. Trubky tak získají vyšší pevnost na přetlak, protože napětí v trubce je dominantnější v radiálním směru.

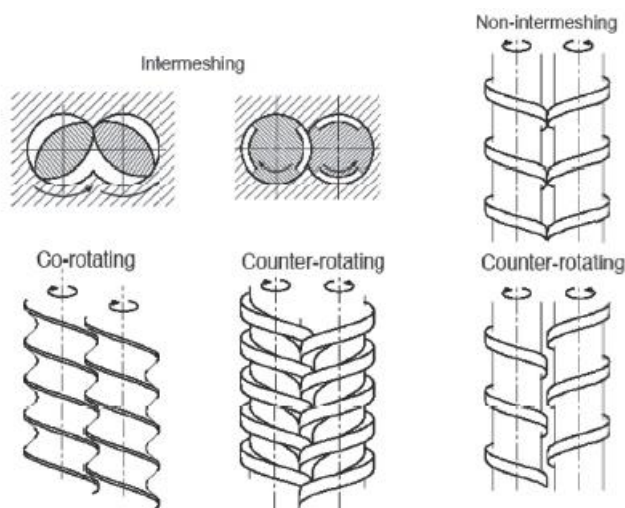
Do kategorie speciálních hlav se řadí i hlava pro vícevrstvé polymerní struktury. Ta se v principu jinak neliší od jednotlivých hlav pro jednovrstvé výrobky. Jen je složitější pro návrh z hlediska toku tavenin. Nutno říci, že takové plasty nachází využití hlavně v obalovém odvětví. Proto hlavním vícevrstvým výrobkem jsou různé fólie. Pro jednovrstvé fólie se používá širokošěrbinová hlava, která se dá využít i pro vícevrstvou fólii. Rozdíl je na vstupu do hlavy, kde jsou do sdružovacího dílu přiváděny proudy tavenin ze samostatných vytlačovacích strojů a jsou zde spojeny v jeden. Na výstupu z hlavy je pak docíleno vícevrstvé struktury, jelikož v hlavě je dosaženo laminárního proudění. Takto vytvořená fólie bývá většinou celistvá, a to ať už symetrického či asymetrického uspořádání. Existují ale i struktury lepené znovu v obou dvou provedeních. [4]

2.2 Dvoušnekový vytlačovací stroj

Dvoušnekový stroj vlastně představuje řadu výhod ve srovnání s tím běžně používaným jednošnekovým. Otázkou tedy zbývá, proč tomu tak je? Odpovědí je cena. Stroje se dvěma paralelními šneky jsou jednoduše výrazně dražší než jejich jednošnekový kolegové. V kapitole 2.1 jsme si uvedli Kaskádový stroj, který lze řadit do této skupiny, protože se jednoduše jedná o stroj se dvěma hřídelemi se šroubovicí a různými jinými sekcemi. Tato kapitola, ale bude spíše o strojích s paralelním řazením, protože jako dvoušnekový vytlačovací stroj je běžně označován stroj právě v této konfiguraci. Hlavně proto, že má odlišné chování v komoře. Tyto paralelní stroje mají ještě jedno velmi podstatné dělení, a to na:

- a) Stroje s protiběžným otáčením šneků
- b) Stroje se stejnoběžným otáčením šneků

Dále se můžeme setkat se stroji, u kterých šroubovice šneku do sebe nezasahují (anglicky non-intermeshing). Mnohem častější je ale konfigurace s do sebe zasahujícími šneky (anglicky intermeshing), protože zde vzniká samočistící efekt. Názorněji na obrázku 12. [2]



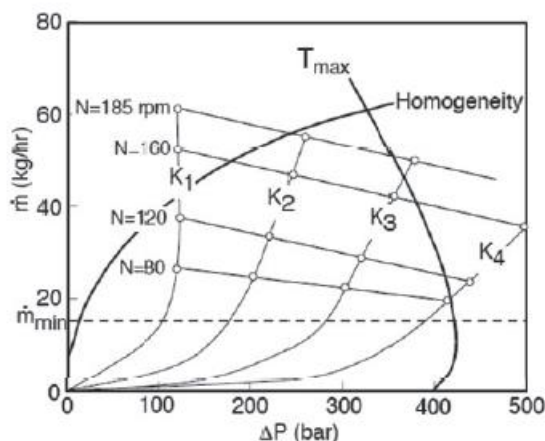
Obr. 12: Uspořádání šneků a jejich šroubovic – (intermeshing -do sebe zabíhající, non-intermeshing – do sebe nezabíhající, co-rotating – stejnoběžné otáčení, counter-rotating – protiběžné otáčení) [2]

Samočistící efekt způsobuje klouzání šroubovic o druhý šnek. Druhým, ale neméně důležitým efektem je nižší doba zdržení polymeru ve šneku, což zvyšuje kvalitu výrobku. Tento fakt vlastně odstraňuje občasné problémy u jednošnekových strojů s uvízlou taveninou například u paty šroubovice. Existují ale i řešení čištění bez demontování pro jednošnekové stroje, které ale nejsou tak přirozeně vycházející z jejich funkce.

Zcela logicky zde vzniká mnohem lepší hnětení a míchání než u jednošneku. Tyto vlastnosti jsou velmi odvislé právě na konfiguraci šneků a jejich chodu. Protiběžné šneky mají mnohem větší míchací účinnost než stejnoběžné, stejně tak do sebe zasahující šroubovice od těch nezasahujících. Stejnoběžný chod zapříčiňuje oběžné proudění taveniny, který má v důsledku horší míchací účinky. Nespornou výhodou krom samočištění u zabíhání šroubovice do drážky druhého šneku je rozdělení tohoto a promísení v něm, což u nezabíhajících není, a proto se s nimi v praxi příliš nesetkáváme. Nicméně ne každý polymer se v jedné či druhé konfiguraci chová stejně, a tak bývá rozdílný názor na věc mezi průmyslem a vědeckou komunitou.

2.3 Operační parametry

Parametry vytlačování závisí především na geometrii šneku a vytlačovací hlavy. Celkově jsou odvislé od proporcí každého stroje. Z technologie procesu je zřejmé, že důležitými parametry je vytlačovací výkon neboli hmotnostní průtok a tlak dosažený v tavenině před vytlačovací hlavou. Graf na obrázku 12 velmi názorně ukazuje průběh těchto veličin pro různé vytlačovací hlavy použité na stroji se šnekem o průměru 45 mm při vytlačování nízko hustotního polyetyleny. Křivky označené K1 až K4 jsou charakteristiky pro vytlačovací hlavy a křivky označené N=80, N=120 atd. jsou charakteristiky šneku při odlišných otáčkách.

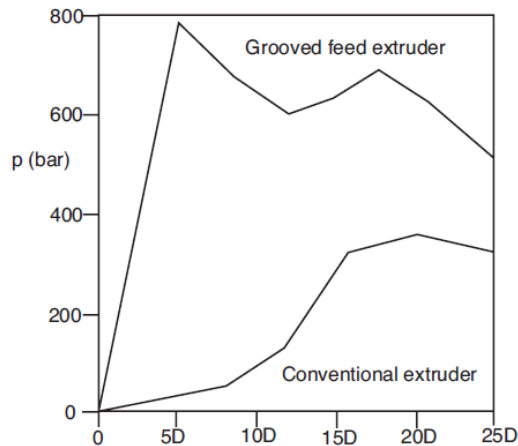


Obr. 13: Charakteristika konvenčního extrudéru při vytlačování LDPE - (rpm – otáčky za minutu, homogeneity – křivka homogeneity) [2]

V grafu jsou dále křivky ohraničující oblasti ideálního provozu stroje. Vodorovná čerchovaná čára představuje minimální průtok potřebný k ekonomickému provozu stroje. Pokud se parametry pohybují pod či napravo od křivky zvané homogeneity znamená to, že výsledná tavenina je plně homogenní. Oblast za křivkou T_{max} pak označuje přílišnou teplotu v tavenině v jejíž důsledku dochází k degradaci polymeru.

Při klasifikaci stroje se hledí také na hodnotu L/D. Představuje poměr délky šneku ku jeho průměru. Čím větší je tento poměr, tím šnek bude opticky delší a v konečném důsledku to znamená, že bude větší doba zdržení polymeru na roztavení. Proto extrudéry s menší hodnotou tohoto poměru se používají především na zpracování elastomerů, které degradují při delším působení tepla. Dalším geometrickým parametrem je kompresní poměr. U dáva se u strojů se šneky, které mají kompresní zónu. Představuje poměr průměrů jader šneku ve výstupní a vstupní zóně. Udává tedy, jak hodně jádro šneku v kompresní zóně tlačí na taveninu změnou jeho průměru.

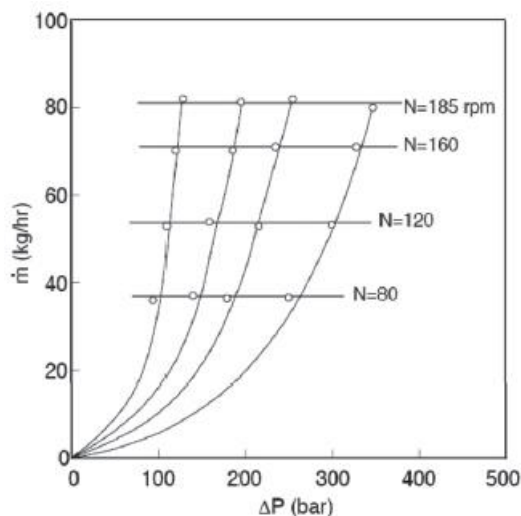
Na hmotnostní průtok má v konečném důsledku největší vliv průměr šneku. Ten v podstatě určí jeho rozsah. Na konečnou hodnotu mají po té největší vliv otáčky šneku a tlaková ztráta hlavy, jak jsme si ukázali v grafu. Nicméně předpokládá to, že jsou zajištěny všechny tokové vlastnosti stroje. U tlaku vyvolaném v homogenizační zóně již není tak dominantní některý z rozměrů, který by ho velkou měrou určoval. Co je ale velmi důležité, aby tlak před hlavou vůbec vznikl je to, že tření na povrchu válce v dutině stroje musí být větší než tření na šneku. Není-li splněna tato podmínka, pak se požadovaného tlaku dosahuje jen velmi těžko a vlastně i všech ostatních požadovaných vlastností taveniny. Grafické znázornění na obrázku 13 vyjadřuje porovnání tlaků konvenčního vytlačovacího stroje a drážkového vytlačovacího stroje po celé délce komory. Je patrné, že pouhým přidáním drážek na povrch této dutiny výrazně vylepší tokové vlastnosti, respektive užitečně zvýší tlak v tavenině už na začátku stroje. Dosahuje se tím nejen tlakové neměnnosti, ale také vysoké výtokové stability.



Obr. 14: Průběh tlaků v extrudérech po délce šnekové komory – (Conventional extruder – konvenční extrudér, Grooved feed extruder – drážkový extrudér) [2]

Toto řešení vynalezené v roce 1969 výrazně posunulo rozpětí zpracovávaných polymerů. Odstranilo totiž problémy u zpracování vysokoviskózních látek nebo u látek s nízkým koeficientem tření. U těchto materiálů vznikla v konvenčním stroji příliš vysoká teplota taveniny, která ji degradovala a zároveň se snižovala produktivita.

Díky získaným vlastnostem konstrukčního řešení drážkových vytlačovacích strojů, například při použití nízkoviskózního polyetyleny, pak téměř nezáleží, jakou vytlačovací hlavu použijete. Stroj si s vyšší tlakovou ztrátou umí poradit, a to dokonce za konstantního hmotnostního průtoku. To znázorňuje graf na obrázku 14, který lze porovnat s obrázkem 12, jelikož je naměřen pro stejný materiál a stejný průměr šneku. Rozdíl je jen v tom, že prvně se jedná o konvenční stroj a v případě obrázku 14 o stroj drážkový. Zde je krásně vidět konstantní průběh průtoků pro různé otáčky a vytlačovací hlavy na rozdíl od konvenčního stroje, kde je klesající tendence.



Obr. 15: Charakteristika drážkového extrudéru pro vytlačování LDPE [2]

2.4 Dílčí závěr kapitoly

Extrudér pro plastikářský průmysl je zařízení sloužící k přípravě taveniny, její homogenizaci a dopravě. Základním rozdělením extrudéru je dle počtu šneků na jednošnekový, dvoušnekový a vícešnekový. Z hlediska univerzálnosti, jednoduchosti konstrukce a hlavně ceny je vhodným kandidátem pro vybavení laboratoří university jednošnekový extrudér s parametry šneku L/D 25 až 35 a kompresním poměrem k_p 2,4 až 2,6.

3 Návrh extrudéru

Při návrhu a pořízení jakéhokoliv stroje se musí brát v potaz jeho účel. Tento návrh se zaměřuje na zařízení do školního prostředí. Není tedy potřeba nijak vysoká výkonnost, ale zejména komplexnost a schopnost zaznamenávat data, která by se dále dala vyhodnocovat. Těmi jsou v tomto případě zejména tlaková ztráta vytlačovací hlavy, provozní teplota a otáčky šneku. Extrudér tedy postačí menších rozměrů s relativně vysokým rozsahem otáček. Jeho parametry by měli být někde v okolí hodnot viz tabulka:

Požadované parametry extrudéru

<i>Maximální výkon extrudéru</i>	10 kg/h
<i>Průměr šneku</i>	≥ 30 mm
<i>Pracovní délka šneku</i>	30 L/D
<i>Celkový příkon</i>	10 kW
<i>Maximální otáčky</i>	150 ot/min

Tab. 1: Požadované parametry extrudéru

Stroj bude sloužit především k výzkumným a výukovým účelům. Provoz stroje tedy nebude nepřetržitý, ale spíše občasný s předpokládanou provozní dobou 10 až 20 h za měsíc. Je požadována povrchová úprava šneku a válce s ohledem na použití materiálu s obsahem skleněných a uhlíkových vláken.

3.1 Extrudér od firmy POTOP

Jedním z vyhovujících vytlačovacích strojů pochází od firmy POTOP. To je firma zabývající se stroji pro laboratoře s pětadvaceti letou tradicí. V podstatě vznikla roku 1993 na Technické univerzitě jižní Číny na jejíž půdě svoji práci vykonávala. Obchodně se oddělila až v roce 2009. Tato firma se specializuje už od samého začátku na výzkum a vývoj v oblasti polymerních materiálů a prodal více jak 500 strojů zejména výzkumným ústavům a univerzitám po celém světě.

V jejich nabídce je zcela logicky malý jednošnekový laboratorní extrudér. V jejich popisu se uvádí, že se jedná o profesionálně vyráběný stroj, zejména šnek a šneková komora, které zaručují vysokou přesnost a kvalitu. Vysoce přesné otáčky a vysoký točivý moment podle uvedených informací zajišťuje i servo motor a celý stroj je řízen PLC systémem od Siemensu. Stroj nabízí v různých konfiguracích uvedených společně s technickými parametry v tabulce 2.



Obr. 16: Jednošnekový extrudér od firmy POTOP [13]

Parametr\typ	jednotky	MESI-20/28	MESI-25/28	MESI-30/30	MESI-35/32
Průměr šneku	mm	20	25	30	35
Délka šneku	L/D	28		30	32
Jmenovité otáčky	rpm	120			
max. teplota	°C	350			
Přesnost teploty	°C	±1			
Topení/chlazení		Elektrické topení / vzduchové chlazení			
Max. výkon	kg/h	3,5	7	13	25
Celkový výkon	kW	10		14	
Celková váha	kg	300		350	400
Velikost	mm	1970x690x1660		2070x690x1660	

Tab. 2: Parametry extrudérů firmy POTOP [13]

Adeptem pro volbu dle geometrických požadavků by byl typ MESI – 30/30. Překračuje ale energetickou náročnost. Z nabídky od firmy POTOP, by se volilo mezi typy MESI 25/28 a MESI 30/30. Stroj od firmy POTOP by se volil na základě zvážení důležitosti dosažení geometrie nebo celkového příkonu a ceny.

3.2 Extrudér od firmy BOCO

Extrudér k laboratorním účelům nabízí také česká firma BOCO Pardubice, která byla založena v roce 1994. Zaměřuje se na výrobu extruzních linek zpracovávající plasty. Do jejich portfolia patří také vlastní výroba a renovace šneků vytlačovacích strojů. Oblastní repasování se nezabývají pouze u šneků, ale i u celých extrudérů.

Mezi jejich produkty se krom recyklačních linek na plasty dá najít i laboratorní extrudér. Předpokládané využití takových to strojů, jak výrobce sám uvádí, je pro specifickou nebo zkušební výrobu. Zejména na zjišťování vad materiálu nebo nečistot v něm a ověření vlastností materiálu mimo sériovou výrobu. V jejich nabídce jsou dva extrudery tohoto typu, které

zahrnují snímače teploty taveniny a tlaku. Jejich parametry jsou vyobrazeny v tabulce 3.

Parametr\typ	jednotky	EB-L 30	EB-L 40
Průměr šneku	mm	30	40
Délka šneku	L/D	27	14
Výkon extrudéru	kg/h	2-10	3-15
Celkový výkon	kW	9	7

Tab. 3: Parametry extrudéru firmy BOCO [14]



Obr. 17: Extrudér BOCO EB-L 30

Z parametrů laboratorních strojů firmy Boco můžeme při hlubší znalosti polymerů poznat, že stroj s označením EB-L 30 je vhodnější ke zpracování termoplastů a stroj EB-L 40 ke zpracování kaučuků a gumárenských směsí. Vyplývá to z pracovní délky šneku a doby zdržení plasty v tavící komoře.

3.3 Dílčí závěr kapitoly

Když se na obě nabídky podíváme z hlediska institutu, pro který je zařízení určeno, tak bude jistě výhodnější spolupracovat s firmou v blízkosti. Přináší to výhody z hlediska konkretizace daného produktu, snadnější řešení reklamačních záležitostí a také mnohem nižších nákladů na dopravu daného produktu, a tudíž výsledné ceny stroje.

4 Návrh šneku extrudéru

Jak jsme si již popsali v rešeršní části této práce, tak šnek extrudéru bývá obvykle s proměnným průřezem v kompresní části. Dále bývá opatřen různými mísicími sekcemi, které taveninu proměšují. Tyto části se ale velice obtížně počítají. Zejména u mísicích sekcí je téměř nemožné vypočítat jaké parametry toku tavenině dají, protože mívají složitou geometrii. Mají funkci pouze homogenizovat taveninu, nicméně na parametrech toku se bez pochyby také podílejí.

Pro zjednodušení výpočtu předpokládám, že navrhovaný šnek bude mít konstantní průměrem jádra po celé jeho délce a bude bez jakékoliv přídavné mísicí sekce. Zkusíme tedy navrhnout šnek, který by splňoval dopravní požadavky pro taveniny polymerů bez sekcí, které zlepšují jeho homogenizační a dopravní vlastnosti. Navrhovaný šnek bude mít parametry uvedené níže v tabulce s ostatními potřebnými parametry pro výpočet. Výsledkem výpočtu bude charakteristika šneku pro izotermní a adiabatické chování taveniny.

Rozměry reologické vytlačovací hlavy jsou navrženy s ohledem na zjednodušení výpočtu parametrů zvoleného mocninového modelu reologického chování toku taveniny (v praxi běžný předpoklad) tak, aby $h/w \ll 1$ a obdélníková kapilára se dala nahradit dvěma paralelními deskami. Tvar kapiláry je zvolen s ohledem na snadné umístění tlakových snímačů do stěny kapiláry.

parametr	zn.	jednotky	hodnota
šnek			
Průměr šroubovice	d	mm	29
Průměr jádra	d_1	mm	25
Průměr tavicí komory	D	mm	30
Délka	L	mm	810
Rozteč šroubovice	s	mm	20
Tloušťka šroubovice	e	mm	2,2
Otáčky	n	s^{-1}	1,5
Rozměry štěrbiny vytlačovací hlavy			
Šířka	w	mm	20
Výška	h	mm	1
Délka	l	mm	155
Vlastnosti dopravované taveniny [15], [16]			
Měrná tepelná kapacita	c	2250	J/(kg.K)
Hustota	ρ	764	kg/m ³
Dynamická viskozita	μ	140	Pa.s
Koeficient lineární tepelné roztažnosti	b	0,00012	K ⁻¹

Tab. 4: Tabulka parametrů pro návrh šneku

4.1 Předpoklad izotermního chování

U výpočtu budeme vycházet z rovnice charakteristiky šroubového čerpadla v izotermních podmínkách, která má tvar:

$$\dot{V}^* = a - \beta \cdot \Delta p^* \quad (1)$$

Pro získání této charakteristiky bude nutné vypočtení konstant „a“ a „β“, které jsou závislé na vlivu bočních stěn, vlivu křivosti a vlivu vůle šroubového listu.

Korekční součinitele vlivu bočních stěn F_d pro unášivé proudění a F_p pro plouživé proudění mají tvar:

$$F_d = 1 - 0,543 \cdot \frac{\frac{D - d_1}{2}}{(s - e) \cdot \cos \varphi_s} \quad (2)$$

$$F_p = 1 - 0,63 \cdot \frac{\frac{D - d_1}{2}}{(s - e) \cdot \cos \varphi_s} \quad (3)$$

kde φ_s je úhel stoupání šroubovice, který se spočítá:

$$\varphi_s = \arctg \frac{2s}{\pi \cdot (D + d_1)} = \arctg \frac{2 \cdot 20}{\pi \cdot (30 + 27)} = 0,227 \text{ rad} = 12,8^\circ \quad (4)$$

Po dosazení vypočteného úhlu a známých hodnot do rovnic (2) a (3) dostaneme hodnoty korekčních součinitelů vlivu bočních stěn.

$$F_d = 1 - 0,543 \cdot \frac{\frac{30 - 25}{2}}{(20 - 2,2) \cdot \cos(0,227)} = 0,921 \quad (5)$$

$$F_p = 1 - 0,63 \cdot \frac{\frac{30 - 25}{2}}{(20 - 2,2) \cdot \cos(0,227)} = 0,909 \quad (6)$$

Dále po součinitele vlivu křivosti budeme potřebovat hodnoty konstant A , σ , κ které vycházejí z geometrických hodnot.

$$\sigma = \frac{s}{D} = \frac{2,2}{30} = 0,667 \quad (7)$$

$$\kappa = \frac{d_1}{D} = \frac{25}{30} = 0,833 \quad (8)$$

$$A = \frac{2\sigma^2}{\pi} \cdot \frac{\kappa^2 - 1 + 4 \cdot \frac{(\kappa \cdot \ln \kappa)^2}{1 - \kappa^2}}{1 - \kappa^4 + \frac{(1 - \kappa^2)^2}{\ln \kappa}} - 1 \quad (9)$$

Po dosazení vypočtených hodnot rovnicemi (7) a (8) dostaneme výsledek:

$$A = \frac{2 \cdot 0,667^2}{\pi} \cdot \frac{0,833^2 - 1 + 4 \cdot \frac{(0,833 \cdot \ln 0,833)^2}{1 - 0,833^2}}{1 - 0,833^4 + \frac{(1 - 0,833^2)^2}{\ln 0,833}} - 1 = -1,054 \quad (10)$$

Vypočtené hodnoty rovnicemi (7), (8) a (9) můžeme dále použít do rovnic korekčních součinitelů vlivu křivosti.

$$F_{dc} = \frac{\pi^2 + \sigma^2}{\pi^2 \cdot (1 - \kappa) \cdot A} \cdot \left[2 \cdot \frac{\kappa^2 \ln \kappa}{\kappa^2 - 1} - 1 \right] \quad (11)$$

$$F_{dc} = \frac{\pi^2 + 0,667^2}{\pi^2 \cdot (1 - 0,833) \cdot (-1,054)} \cdot \left[2 \cdot \frac{0,833^2 \ln 0,833}{0,833^2 - 1} - 1 \right] \quad (12)$$

$$F_{dc} = 1,019 \quad (13)$$

$$F_{pc} = \frac{(3 \cdot (\pi^2 + \sigma^2))}{2 \cdot \pi^2 \cdot (1 - \kappa)^3 \cdot A} \cdot \left[\kappa^2 - 1 + 4 \cdot \frac{(\kappa \cdot \ln \kappa)^2}{1 - \kappa^2} \right] \quad (14)$$

$$F_{pc} = \frac{(3 \cdot (\pi^2 + 0,667^2))}{2 \cdot \pi^2 \cdot (1 - 0,833)^3 \cdot (-1,054)} \cdot \left[0,833^2 - 1 + 4 \cdot \frac{(0,833 \cdot \ln 0,833)^2}{1 - 0,833^2} \right] \quad (15)$$

$$F_{pc} = 1,081 \quad (16)$$

Z korekčních součinitelů zbývají spočítat součinitele vlivu vůle. Pro ty jsou následující vzorečky:

$$k_d = \frac{D - d}{D - d_1} + \frac{d - d_1}{D - d_1} \cdot \frac{s}{s - e + e \cdot \left(\frac{D - d_1}{D - d} \right)^3} \quad (17)$$

$$k_d = \frac{30 - 29}{30 - 25} + \frac{29 - 25}{30 - 25} \cdot \frac{20}{20 - 2,2 + 2,2 \cdot \left(\frac{30 - 25}{30 - 29}\right)^3} = 0,255 \quad (18)$$

$$k_p = \frac{e}{s - e} \cdot \left(\frac{D - d}{D - d_1}\right)^3 + \frac{(\pi \cdot D)^2}{(s - e) \cdot \left[s - e + e \cdot \left(\frac{D - d_1}{D - d}\right)^3\right]} \quad (19)$$

$$k_p = \frac{2,2}{20 - 2,2} \cdot \left(\frac{30 - 29}{30 - 25}\right)^3 + \frac{(\pi \cdot 30)^2}{(20 - 2,2) \cdot \left[20 - 2,2 + 2,2 \cdot \left(\frac{30 - 25}{30 - 29}\right)^3\right]} \quad (20)$$

$$k_p = 1,705 \quad (21)$$

Poslední konstanty pro výpočet konstant v charakteristice šroubového čerpadla jsou a_0 a β_0 .

$$a_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{d} - \frac{d_1}{d}\right) \cdot \left(\frac{s}{d} - \frac{e}{d}\right) \cdot \frac{D}{d} \cdot \cos^2 \varphi_t \quad (22)$$

kde φ_t je třecí úhel a spočítá podle vzorce:

$$\varphi_t = \arctg \frac{s}{\pi \cdot D} = \arctg \frac{20}{\pi \cdot 30} = 0,209 \text{ rad} \quad (23)$$

a po dosazení do rovnice (22) spočítáme:

$$a_0 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{30}{29} - \frac{25}{29}\right) \cdot \left(\frac{20}{29} - \frac{2,2}{29}\right) \cdot \frac{30}{29} \cdot \cos^2 0,209 = 0,082 \quad (24)$$

Druhá konstanta β_0 se vypočítá ze vzorce:

$$\beta_0 = \frac{1}{96} \cdot \left(\frac{s}{d} - \frac{e}{d}\right) \cdot \left(\frac{D}{d} - \frac{d_1}{d}\right)^3 \cdot \sin \varphi_t \cdot \cos \varphi_t \quad (25)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{96} \cdot \left(\frac{20}{29} - \frac{2,2}{29}\right) \cdot \left(\frac{30}{29} - \frac{25}{29}\right)^3 \cdot \sin 0,209 \cdot \cos 0,209 = 6,654 \cdot 10^{-6} \quad (26)$$

Výše jsou již spočítány všechny potřebné hodnoty pro výpočet konstant „a“ a „β“, které mají rovnice:

$$a = a_0 \cdot F_d \cdot F_{ac} \cdot (1 - k_d) = 0,082 \cdot 0,921 \cdot 1,019 \cdot (1 - 0,255) = 0,058 \quad (27)$$

$$\beta = \frac{\beta_0 \cdot F_p \cdot F_{pc} \cdot (1 + k_p)}{\frac{L}{d}} = \frac{6,654 \cdot 10^{-6} \cdot 0,909 \cdot 1,081 \cdot (1 + 1,705)}{\frac{810}{29}} \quad (28)$$

$$\beta = 6,333 \cdot 10^{-7} \quad (29)$$

Výsledný tvar rovnice popisující charakteristiku „čerpadla“ pro konkrétní rozměry šneku a bude:

$$\dot{V}^* = 0,058 - 6,333 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta p^* \quad (30)$$

V této rovnici, ale pořád máme dvě neznámé. Budeme tedy potřebovat i rovnici popisující charakteristiku vytlačovací hlavy, abychom dokázali spočítat pracovní bod vytlačovacího stroje. Rovnice charakteristiky vytlačovací hlavy má následující podobu:

$$\dot{V}^* = k_h \cdot \Delta p^* \quad (31)$$

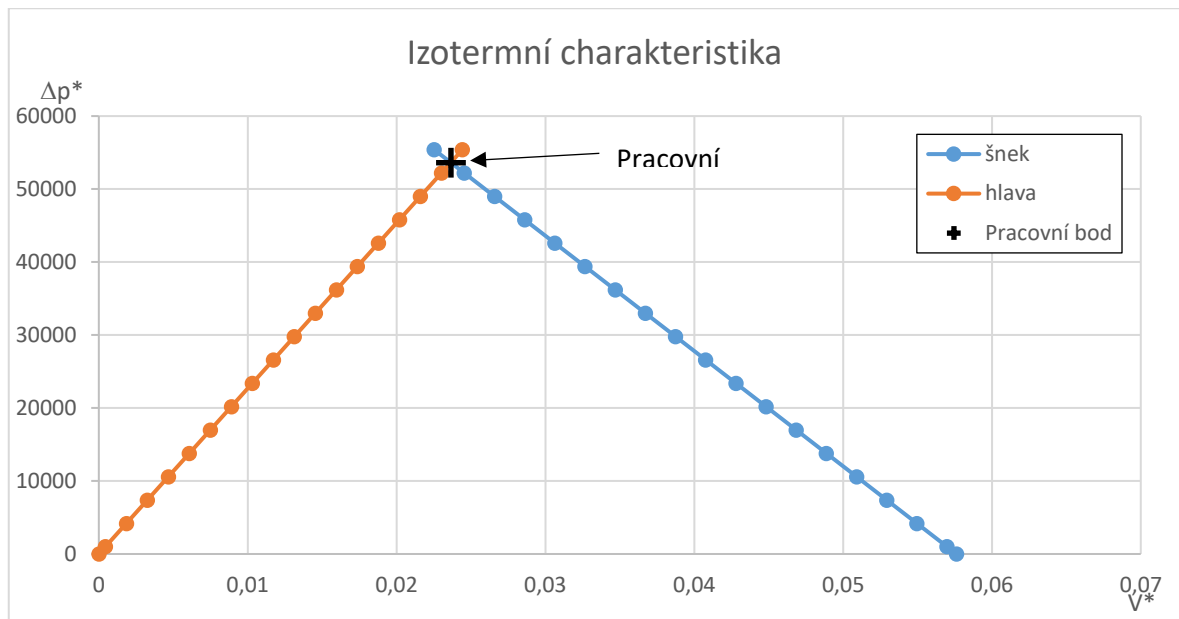
V této rovnici potřebujeme získat koeficient hlavy k_h , který lze spočítat pomocí rovnice:

$$k_h = \frac{w \cdot h^3}{\frac{12 \cdot d^4}{L_h^*}} = \frac{w \cdot h^3}{\frac{l}{d}} = \frac{20 \cdot 1^3}{\frac{155}{29}} = 4,409 \cdot 10^{-7} \quad (32)$$

Výsledná tvar rovnice popisující charakteristiku vytlačovací hlavy pro její konkrétní rozměry a konkrétní rozměry šneku bude:

$$\dot{V}^* = 4,409 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta p^* \quad (33)$$

Dosazením rovnice (30) do rovnice (33) bychom po úpravě mohli vypočítat bezrozměrné hodnoty pracovního bodu. Nicméně celý výpočet byl proveden v programu Excel, tak si nejdříve ukážeme bod graficky. Stačí si totiž zvolit například hodnoty bezrozměrného objemu, dopočítat hodnoty bezrozměrného tlaku a sobě odpovídající hodnoty zanést do grafu. Graficky pak dostaneme pracovní přímky hlavy a šnekového čerpadla.



Obr. 18: Graf izotermní závislosti šnekového čerpadla

Následně pak v místě protnutí těchto přímek se nachází pracovní bod. Dosazením rovnice (1) do rovnice (30) za \dot{V}^* získáme rovnici pro výpočet jedné souřadnice pracovního bodu, která po úpravě vypadá:

$$\Delta p^* = \frac{a}{\beta + k_h} \quad (34)$$

Provedeme-li stejný postup akorát dosadíme za Δp^* získáme rovnici pro výpočet druhé souřadnice, která po úpravě vypadá:

$$\dot{V}^* = \frac{k_h \cdot a}{k_h + \beta} \quad (35)$$

Máme-li tyto rovnice (34) a (35), můžeme si vypočítat konkrétní bezrozměrné hodnoty pracovního bodu.

$$\Delta p^* = \frac{0,058}{6,334 \cdot 10^{-7} + 4,409 \cdot 10^{-7}} = 53633 \quad (36)$$

$$\dot{V}^* = \frac{4,409 \cdot 10^{-7} \cdot 0,058}{4,409 \cdot 10^{-7} + 6,334 \cdot 10^{-7}} = 0,0236 \quad (37)$$

Tyto bezrozměrné hodnoty pak lze přepočítat na rozměrové pomocí definičních vztahů, které definují bezrozměrný parametr, ze kterých je vyjádřen potřebný parametr rozměrový:

$$\Delta p = \Delta p^* \cdot \mu \cdot n = 53633 \cdot 140 \cdot 1,5 = 11263063 \text{ Pa} = 11,2 \text{ MPa} \quad (38)$$

$$\dot{V} = \dot{V}^* \cdot \dot{n} \cdot d^3 = 0,0236 \cdot 1,5 \cdot 29^3 = 865 \text{ } \mu\text{l/s} = 0,865 \text{ ml/s} \quad (39)$$

Hodnota objemového průtoku odpovídá 2,38 kg/h, což je téměř spodní hranice výkonu navrhovaného extrudéru. Navíc výpočet byl proveden pro 90 ot/min, což zdaleka není minimální hodnota nastavovaná pro extrudér.

4.2 Předpoklad adiabatického chování

Výše jsou analytické výsledky pro izotermický děj čili při kterém nedochází ke změně teploty. Jelikož jsou známé i charakteristiky šneku a hlavy při adiabatickém ději, které obsahují některé již vypočtené hodnoty není až tak složité si je dopočítat.

Bude potřeba dopočítat 4 hodnoty, abychom si mohli vyobrazit i adiabatickou charakteristiku. Těmi jsou parametr příkonové charakteristiky, bezrozměrné otáčky a bezrozměrnou teplotní závislost.

Nejprve tedy parametr příkonové charakteristiky. Ten se vypočítá jako součet dvou hodnot následovně:

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_c \quad (40)$$

kde parametr γ_0 se vypočítá podle vztahu:

$$\gamma_0 = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{(s - e)}{D - d_1} \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^2 \cdot \cotg \varphi_t \cdot (\cos^2 \varphi_t + 4 \cdot \sin^2 \varphi_t) \quad (41)$$

A parametr γ_c se vypočítá ze vztahu:

$$\gamma_c = 4 \cdot \pi^3 \cdot \frac{e}{s} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \quad (42)$$

Jelikož všechny geometrické parametry těchto rovnic známe nebo jsme je vypočetli v předchozích výpočtech, tak můžeme do rovnic (41), (42) a (40) dosadit získat vypočtením tyto hodnoty:

$$\gamma_0 = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{(20 - 2,2)}{30 - 25} \cdot \left(\frac{30}{29}\right)^2 \cdot \cotg 0,209 \cdot (\cos^2 0,209 + 4 \cdot \sin^2 0,209) = 400,19 \quad (43)$$

$$\gamma_c = 4 \cdot \pi^3 \cdot \frac{2,2}{20} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{29}{30}\right)^2} = 208,11 \quad (44)$$

$$\gamma = 400,19 + 208,11 = 608,30 \quad (45)$$

Druhým potřebným parametrem pro vyobrazení adiabatické charakteristiky jsou bezrozměrné otáčky šneku.

$$n^* = \frac{n \cdot \mu \cdot b}{\rho \cdot c} = \frac{1,5 \cdot 140 \cdot 0,00012}{764 \cdot 2250} = 1,466 \cdot 10^{-8} \quad (46)$$

Třetím a posledním potřebným parametrem vyskytující se v adiabatické charakteristice šneku a hlavy je teplotní bezrozměrná závislost.

$$T^* - T_0^* = \ln \left[1 + \frac{\gamma \cdot \beta + (a - \dot{V}^*)^2}{\beta} \cdot \frac{n^*}{\dot{V}^*} \cdot L^* \right] \quad (47)$$

Jak vidíme, tak rovnice využívá jak parametru příkonové charakteristiky, tak bezrozměrné otáčky šneku. Nicméně v rovnici se vyskytuje i bezrozměrný objem. Ten se ale vyskytuje i v rovnicích charakteristik šneku a hlavy, které vypadají následujícím způsobem:

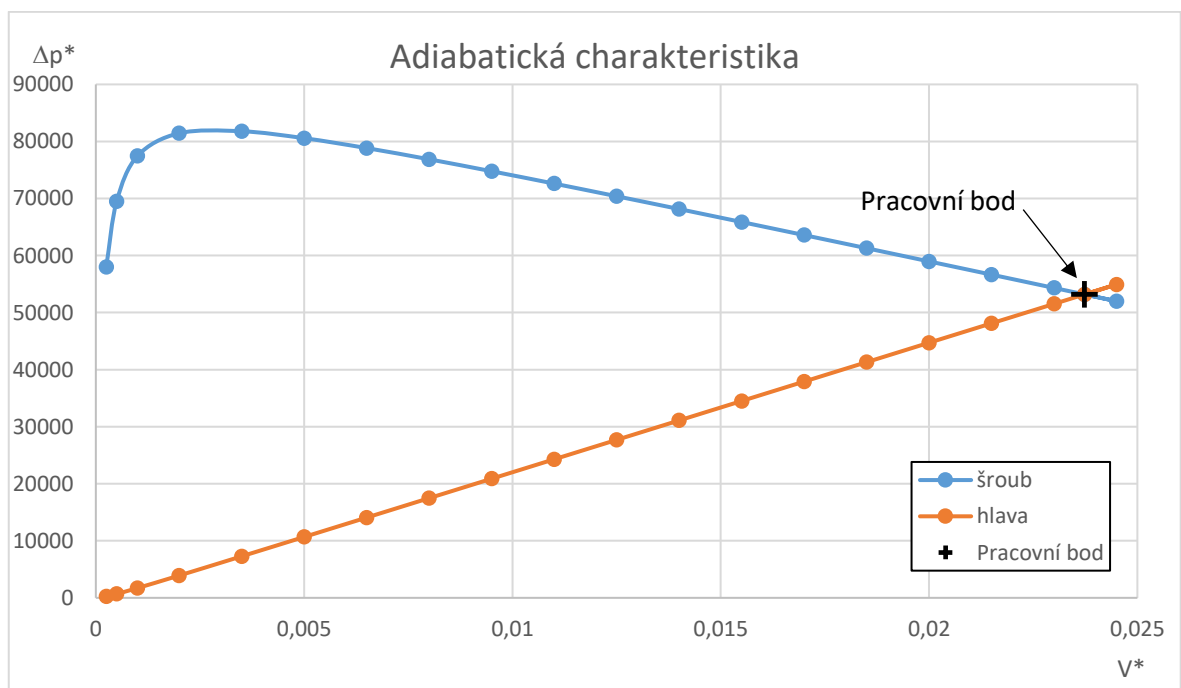
- Šnek

$$\Delta p^* = \frac{a - \dot{V}^*}{\gamma \cdot \beta + (a - \dot{V}^*)^2} \cdot \frac{\dot{V}^*}{n^*} \cdot (T^* - T_0^*) \quad (48)$$

- Hlava

$$\Delta p^* = \frac{1}{n^*} \cdot \ln \left(1 + \frac{n^* \cdot \dot{V}^* \cdot L_h^*}{\kappa_h \cdot e^{T^* - T_0^*}} \right) \quad (49)$$

V tomto případě není vyjádření dvou neznámých z rovnic zrovna jednoduché, nicméně při stejném postupu volby jednoho z parametrů, kterým bude bezrozměrný objem a dopočítání toho druhého znovu dostaneme jednotlivé body charakteristik. Ty lze pak jednoduše vynést do grafu a v místě jejich průtnutí je pracovní bod. Jak jsme si již uvedli u izotermní charakteristiky, výpočet byl proveden v programu Excel, kde lze vytvořit i zmiňovaný graf.



Obr. 19: Graf adiabatické závislosti šnekového čerpadla

S využitím funkce řešitel v programu Excel na základě znalosti, že v pracovním bodě musí být stejný bezrozměrný tlak, iteračně dopočítáme bezrozměrný objem v pracovním bodě. Program dal následující hodnoty:

$$\Delta p^* = 53189 \quad (50)$$

$$\dot{V}^* = 0,0237 \quad (51)$$

Bezrozměrné hodnoty následně propočítáme stejnými rovnicemi jako u izotermního děje na rozměrové. Tedy rovnicemi (38) a (39).

$$\Delta p = \Delta p^* \cdot \mu \cdot n = 53189 \cdot 140 \cdot 1,5 = 11169837 \text{ Pa} = 11,17 \text{ MPa} \quad (52)$$

$$\dot{V} = \dot{V}^* \cdot \dot{n} \cdot d^3 = 0,0237 \cdot 1,5 \cdot 29^3 = 868 \text{ } \mu\text{l/s} = 0,868 \text{ ml/s} \quad (53)$$

4.3 Dílčí závěr kapitoly

Z návrhového výpočtu je patrné, že pro zjednodušený tvar šneku je minimální rozdíl parametrů pracovního bodu při uvažování izotermního nebo adiabatického chování taveniny. Po předběžném vyhodnocení výsledků výpočtu je zřejmé, že navržený šnek nebude vyhovovat požadovaným parametrům extrudéru z hlediska dodávaného průtoku taveniny. Pro hustotu taveniny běžných polymerů 800 až 1200 kg/m³ vychází průtok kolem 3 kg/h což je podstatně vzdáleno požadavku 10 kg/h, resp. nevytvoří dostatečný tlak před hlavou, který by byl schopen protlačit požadované množství kapilárou. Řešením samozřejmě je vytvoření plastifikační a kompresní zóny na šneku, změnou geometrie šneku.

5 Návrh hlavy extrudéru

Hlava pro navrhovaný extrudér vychází z požadavku měření reologických vlastností roztaveného polymeru. Hlava tedy musí být opatřena tlakovými snímači na začátku a na konci vytlačovací hlavy. Další určující věcí pro specifikaci hlavy je fakt, že pro lepší snímání tlaku je vhodnější obdélníkový průřez kapiláry na rozdíl od kruhového.

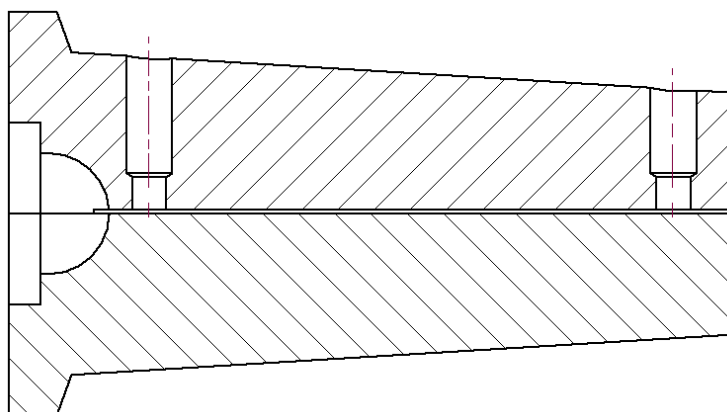
V návrzích se tedy vychází z daného tvaru výstupu z extrudéru, který určuje tvar vstupu do hlavy a průřezu kapiláry, který je stanoven na 20 mm do šířky a 1 mm do výšky. Šířka kapiláry pak umožní lepší snímání tlaku v tavenině.

Rozměry reologické vytlačovací hlavy jsou navrženy s ohledem na zjednodušení výpočtu parametrů zvoleného mocninového modelu reologického chování toku taveniny (v praxi běžný předpoklad) tak, aby $h/b \ll 1$ a obdélníková kapilára se dala nahradit dvěma paralelními deskami. Tvar kapiláry je zvolen s ohledem na snadné umístění tlakových snímačů do stěny kapiláry.

5.1 Kuželová hlava

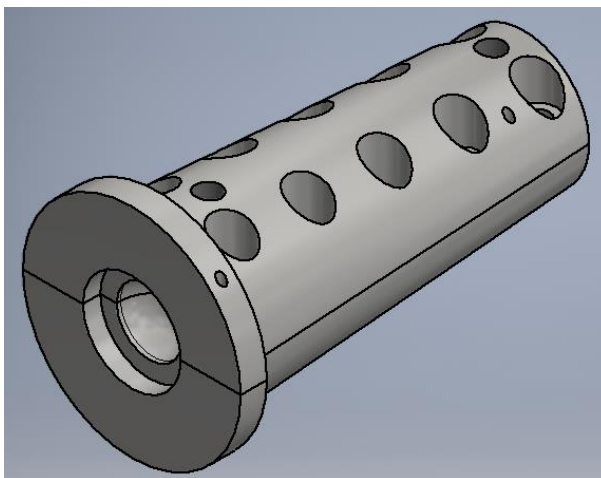
Návrh proměnného průřezu hlavy ve směru osy kapiláry má základ v proměnném tlakovém profilu na vstupu do hlavy a na jejím výstupu. Je to návrh, který dává hlavě větší tuhost v místě, ve kterém je tlak nejvyšší, a naopak menší tuhost, kde je tlak násobně menší. Příčný řez návrhu můžeme vidět na obrázku Obr. 20 a v 3D zobrazení na obrázku Obr. 21.

Vstupní částí hlavy je vyfrézovaný půlkulový otvor, který má zajišťovat plynulý přechod taveniny do kapiláry. Dále jsou na obrázku Obr. 20 vidět otvory pro tlakové snímače. Umístění na začátku a na konci je důležité pro měření tlakové ztráty hlavy.



Obr. 20: Příčný řez návrhu kuželové hlavy [Příloha 1]

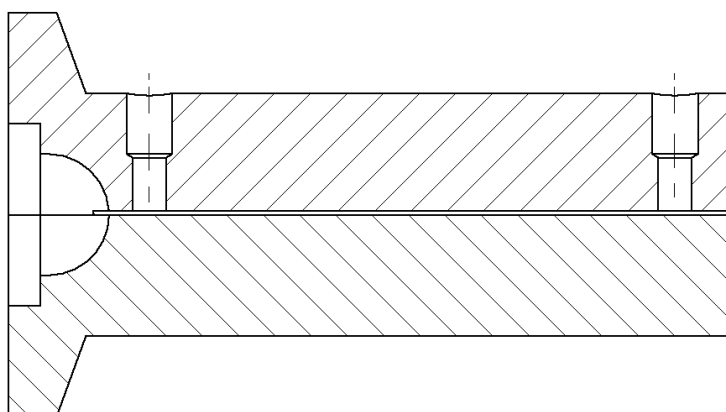
Z technologického hlediska však tento návrh nemá svoje opodstatnění. Při výrobě takového kusu soustružením se prodlužuje strojní čas na obrábění kuželové části a odebírá se materiál v místě, kde ničemu nevadí a z pevnostního hlediska vlastně součást zeslabuje. Vzhledem ke kusové výrobě, není ušetření hmotnosti hlavy výrazným přínosem.



Obr. 21: 3D zobrazení návrhu kuželové hlavy

5.2 Hlava s minimálním průměrem

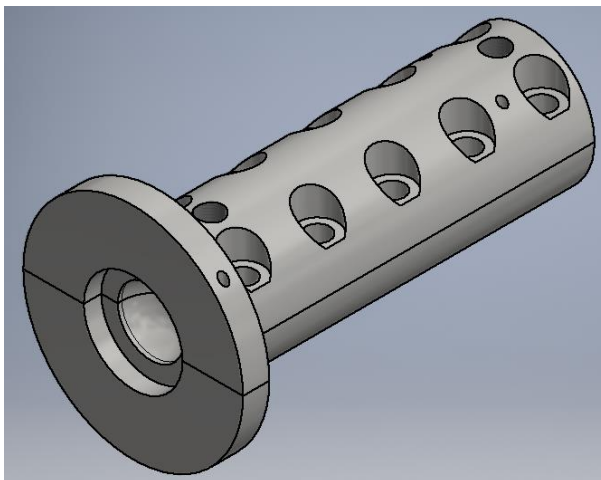
Myšlenka návrhu hlavy s co nejmenším průřezem je v úspoře použitého materiálu, a tudíž zlevnění hlavy jako celku, což je v dnešní době populární. U takového řešení jakéhokoliv výrobku je ovšem potřeba zvážit, jestli takový výrobek bude vyhovovat pevnostně a cyklickému namáhání. Bohužel firmy sériových výrob stále častěji upřednostňují prodejnost výrobků před jejich trvanlivostí. V případě vytlačovací hlavy se ale jedná o kusovou výrobu a požadavky zákazníka mohou netrvanlivému výrobku předejít. Návrh hlavy s úzkým průměrem pláště okolo kapiláry je vyobrazen na obrázcích 19 a 20.



Obr. 22: Příčný řez hlavy s úzkým průměrem [Příloha 2]

Při promyšlení výroby takové konfigurace se jistě nabízí svařenec, navaření příruby k tělu kapiláry. Jenže plného průvaru by se dosahovalo s

problémy a případný vzniklý vrub by při neúplném provaření znamenal problém, protože v hlavě jsou dosahovány tlaky v desítkách megapascal. Logičtější se tedy zdá znovu soustružení výrobku z jednoho polotovaru, což bude zvyšovat výrobní náklady.

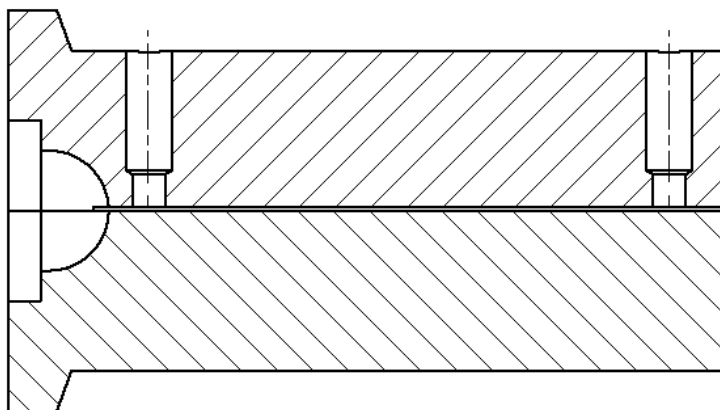


Obr. 23: 3D zobrazení hlavy s malým průměrem těla kapiláry

Z 3D zobrazení návrhu můžeme vidět, že při smontování by po obvodu vystupovaly hlavy šroubů. Řešení tedy není úplně optimální z hlediska estetiky, ale i z hlediska pevnostního.

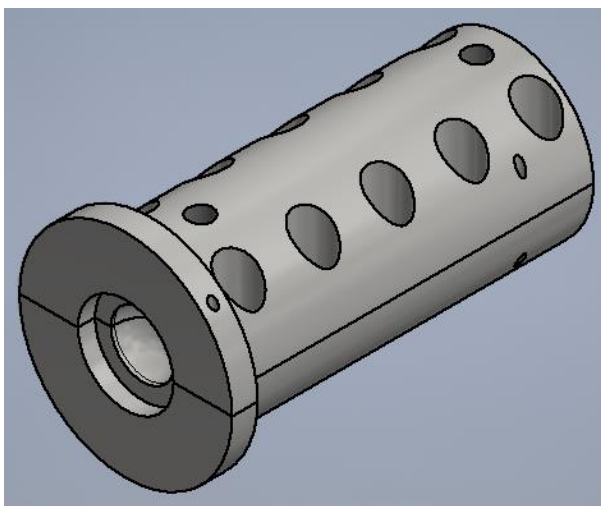
5.3 Hlava s větším průměrem

Větší průměr těla kapilární části hlavy předchází některým konstrukčním nedostatkům hlavy s menším průměrem popsaných výše. Navíc s větším průměrem je možnost zvětšit vzdálenost děr šroubů od kapiláry. U návrhu s menším průměrem je tato vzdálenost velmi malá, což by mohlo způsobit zatečení taveniny až do oblasti děr šroubů. Dosahuje se také větší styčné plochy obou dílů hlavy.



Obr. 24: Příčný řez hlavou s větším průměrem [Příloha 3]

Na obrázcích můžeme vidět robustnější tělo, které jen od pohledu vypadá, že snese více než předchozí typ. Další výhodou od předchozího typu je větší rozsah umístění děr pro šrouby. Jak jsme si již popsali, tak z rozboru technologie výroby je jasné, že bude lepší tento díl obrábět jako jeden kus a tento návrh v porovnání s předchozími návrhy je i co se týče strojního času obrábění na tom lépe. Maximální průměr hlavy se řídí potřebným dosedacím průměrem třmenu přírubového spoje clamp.



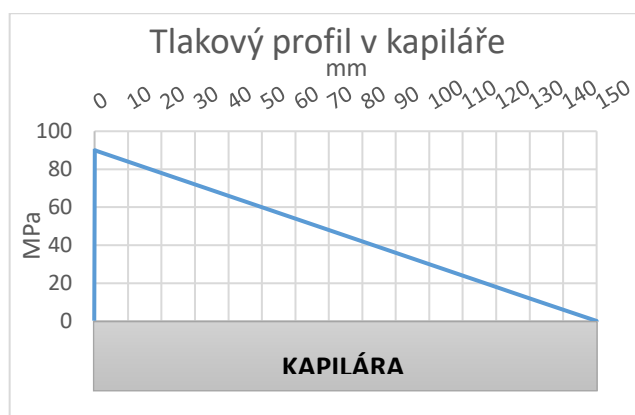
Obr. 25: 3D zobrazení návrhu hlavy s větším průměrem

Z popisu a hodnocení všech návrhů na vytlačovací hlavu je zřejmé, že právě poslední návrh je tím nejvhodnějším. Tento návrh si tedy rozebereme detailněji výpočty.

5.3.1 Pevnostní výpočet

Tento výpočet se vztahuje vlastně ke všem navrženým hlavám. Pevnostně kontroluje navržené šrouby, které jsou záměrně u všech hlav stejné a ve stejném počtu. Výpočet napětí ve šroubech je tedy všude stejný, jelikož i rozměry kapiláry jsou takové.

Tlakový profil v kapiláře bude mít přibližně lineární průběh vyobrazený na obrázku Obr. 26 a proto budu počítat s jeho střední hodnotou. Tento profil odpovídá maximálnímu průtoku poskytovaného strojem Boco EB-L 30, který nám v návrhu stroje vyšel jako lepší varianta. Tlaková ztráta z výpočtů uvedených později v práci se vyjde někde na hranici 90 MPa, proto předpokládám takový průběh.



Obr. 26: Graf rozložení tlaku v kapiláře vytlačovací hlavy

Tlak v dané kapiláře pro HDPE se smykovou rychlostí $\dot{\gamma} = 1323 \text{ s}^{-1}$ má přibližně takový průběh. Z toho tedy vyplývá, že střední tlak je zhruba 45 MPa.

Důležité hodnoty pro pevnostní výpočet jsou v následující tabulce. Vychází z vlastností šroubů pevnostní třídy 8.8, rozměrů kapiláry a výše zmíněného tlaku.

název	zn.	jednotka	hodnota
Šroub M10 8.8			
Mez kluzu při 100°C	σ_k	MPa	590
Průměr dřívku	d_d	m	0,008
Počet šroubů	N	[-]	10
kapilára			
Šířka	w	m	0,02
Délka	l	m	0,155
Tlak v kapiláře	p	MPa	45

Tab. 5: Tabulka hodnot pro pevnostní výpočet

Vycházíme z předpokladu, že vzniká pouze tahové napětí způsobené silou ve šroubu, která vzniká daným tlakem. Celková síla působící na všechny šrouby se vypočte vztahem:

$$F_c = p \cdot S = p \cdot \frac{\pi \cdot d_d^2}{4} \quad (54)$$

$$F_c = 45\,000\,000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} = 139500 \text{ N} \quad (55)$$

Předpokládáme však, že celková síla je rovnoměrně rozložena do všech šroubů a vzniklá síla ve šroubu je následující.

$$F = \frac{F_c}{N} = \frac{139500}{10} = 13950 \text{ N} \quad (56)$$

Z této síly dále můžeme získat tahové napětí vzniklé v jednom šroubu. Počítáme s průměrem dříku šroubu d a jsme tak na straně bezpečnosti.

$$\sigma_t = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d^3}{4}} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^3} \quad (57)$$

$$\sigma_t = \frac{4 \cdot 13950}{\pi \cdot 0,008^3} = 277\,526\,430 \text{ Pa} = 277,5 \text{ MPa} \quad (58)$$

Jelikož extrudér pracuje na principu šroubového čerpadla, tak předpokládáme míjivé zatížení šroubů. U míjivého zatížení se běžně počítá s 60 % využití hodnoty meze kluzu. Dovolené napětí tedy vypočítáme jako:

$$\sigma_D = 0,6 \cdot \sigma_k = 0,6 \cdot 590 = 354 \text{ MPa} \quad (59)$$

Bezpečnost pak pro toto napětí je:

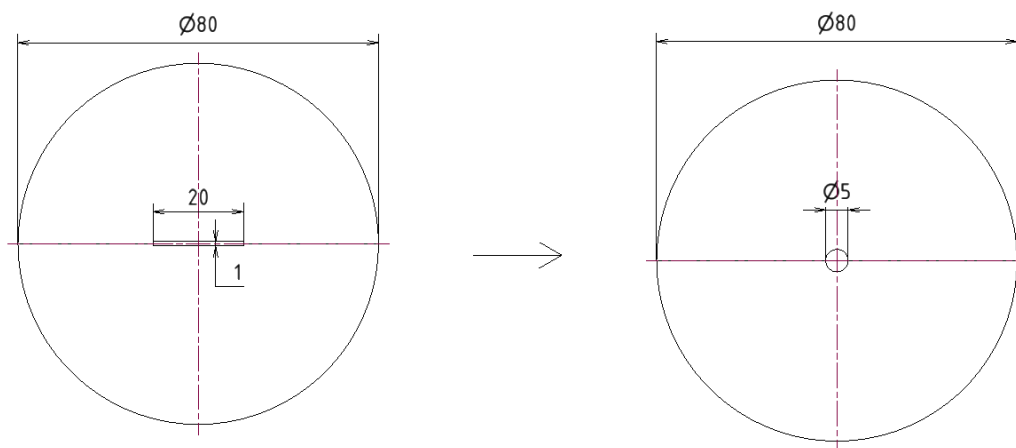
$$k = \frac{\sigma_D}{\sigma_t} = \frac{354}{277,5} = 1,28 \quad (60)$$

Výsledkem pevnostního výpočtu je vyhovující šroub. Napětí ve šroubu se dostane na necelou polovinu napětí meze kluzu. Mez únavy je běžně v okolí třetinové hodnoty meze kluzu, což napětí v tomto šroubu o něco převyšuje. Pokud tedy byl požadavek na doživotní životnost podle Wöhlera a bezúdržbovou hlavu, musel by se volit šroub většího průměru nebo vyšší pevnostní třídy.

5.3.2 Tepelné ztráty hlavy

Vybraný návrh hlavy si propočteme i z hlediska tepelného. Ztráty tepla na hlavě jsou obvykle žádoucí, protože je potřeba taveninu před vystoupením z hlavy, alespoň trochu ochladit. Navrhovaný kus není nijak zvlášť chlazený a tepelné ztráty probíhají přirozenou konvekcí. Z toho vyplývá součinitel přestupu tepla, který jsme zvolili $\alpha = 5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Z důvodu použití vztahu platného pro vedení tepla ve válcové stěně aproximujeme průřez kapiláry na kruhový o stejné ploše průřezu. Příčný řez aproximovanou bude vypadat jako na obrázku Obr. 27.



Obr. 27: Aproximace průřezu hlavy

S využitím této aproximace budeme pro daný výpočet potřebovat tyto hodnoty:

název	zn.	jednotka	hodnota
Vytlačovací hlava			
Poloměr kapiláry	R_1	m	0,0025
Poloměr hlavy	R_2	m	0,04
Délka kapiláry	l	m	0,155
Tepelná vodivost	λ	W/(m.K)	15
Prostředí			
Teplota okolí	T_o	K	298,15
Součinitel přestupu tepla	α	W/(m ² K)	5
Tavenina			
Teplota taveniny	T_{s1}	K	473,15

Tab. 6: Hodnoty po výpočet tepelných ztrát

Nahradíme-li takto kapiláru hlavy můžeme s výhodou použít vztah pro výpočet vedení tepla ve válcové stěně.

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot \lambda}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \quad (61)$$

V této rovnici, ale máme bohužel dvě potažmo tři neznámé. Tou je jednak teplo, které hledáme, ale dále obě teploty stěn. Náš výpočet ale bude počítán pro již zahřátou hlavu a teplota stěny kapiláry bude stejná jako teplota taveniny. Druhá neznámá tedy je teplota stěny hlavy.

Pro výpočet je tedy potřeba další rovnice, která vychází z Newtonovy hypotézy přenosu tepla na stěně.

$$Q = \alpha \cdot S \cdot \Delta T = \alpha \cdot S \cdot (T_{s2} - T_o) \quad (62)$$

Dosazením jedné rovnice do druhé a její úpravou získáme vyjádřenou teplotu stěny hlavy.

$$T_{S_2} = \frac{\frac{2 \cdot \lambda}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot T_{S_1} + \alpha \cdot 2 \cdot R_2 \cdot T_o}{\alpha \cdot 2 \cdot R_2 + \frac{2 \cdot \lambda}{\ln \frac{R_2}{R_1}}} \quad (63)$$

Jelikož ostatní hodnoty v rovnici, krom teploty jsou známe můžeme do rovnice dosadit a teplotu stěny hlavy spočítat.

$$T_{S_2} = \frac{\frac{2 \cdot 15}{\ln \frac{0,04}{0,0025}} \cdot 473,15 + 5 \cdot 2 \cdot 0,04 \cdot 298,15}{5 \cdot 2 \cdot 0,04 + \frac{2 \cdot 15}{\ln \frac{0,04}{0,0025}}} = 466,91 \text{ K} \quad (64)$$

Tato teplota odpovídá 193,76 °C a dosazením této teploty do rovnice (61) či (62) získáme tepelné ztráty vytlačovací hlavou.

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_{S_2} - T_o) = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot l \cdot (T_{S_2} - T_o) \quad (65)$$

$$Q = 5 \cdot \pi \cdot 0,08 \cdot 0,155 \cdot (466,91 - 298,15) = 32,87 \text{ W} \quad (66)$$

Výsledkem výpočtu rovnice je, že tepelné ztráty v oblasti vytlačovací hlavy jsou přibližně 33 W.

5.3.3 Návrh kapiláry

Jak již bylo uvedeno výše, tak tvar a rozměry kapiláry jsou dané požadavky měření tlaku. Průřez kapiláry tedy musí být obdélníkový pro snadnější umístění tlakových snímačů. Níže tedy bude ukázán výpočet smykové rychlosti, tečného napětí, tlakové ztráty a objemový průtok pro konkrétní taveninu plastu pod zkratkovitým názvem HDPE, což je speciální forma polyetylenu.

název	zn.	jednotka	hodnota
Vytlačovací stroj Boco [14]			
Maximální výkon	P	kg/h	10
Kapilára			
Šířka	w	m	0,02
výška	h	m	0,001
Délka	l	m	0,155
Tavenina [16]			
Hustota	ρ	kg/m ³	764
Index toku	m	[-]	0,61
Koeficient koexistence	K	Pa.s ^m	3730

Tab. 7: Hodnoty pro návrh kapiláry

5.3.3.1 Smyková rychlost

U smykové rychlosti v kapiláře budeme vycházet ze dvou výchozích hodnot. První je maximální hodnota průtoku, která je u vhodnějšího extrudéru, minimálně místně, od firmy Boco na hodnotě 10 kg/h. Pro výpočet smykové rychlosti je dále důležité, který materiál kapilárou proudí. Ve výpočtu se budeme dále držet vyhodnocovaného materiálu HDPE, který má index toku $m=0,61$, což je druhá hodnota potřebná pro vyhodnocení smykové rychlosti. Dále budeme předpokládat, že poměr šířky kapiláry ku výšce jde k nekonečnu a tím pádem se dá použít vztah smykové rychlosti mezi dvěma deskami. Než ale vypočítáme smykovou rychlost [12], musíme si přepočíst hmotnostní průtok na objemový.

$$\dot{V} = \frac{P}{\rho} = \frac{10}{764} = 3,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \quad (67)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \dot{V}}{w \cdot h^2} \cdot \left[2 + \frac{1}{m}\right] = \frac{2 \cdot 3,64 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 0,001^2} \cdot \left[2 + \frac{1}{0,61}\right] = 1323 \text{ s}^{-1} \quad (68)$$

5.3.3.2 Tečné napětí

Vztah pro tečné napětí na stěně vychází z úvahy mocninového modelu, jehož parametry je tavenina HDPE popsána, viz tabulka Tab. 7.

V našem případě uvažujeme $\tau_y = 0$, a proto můžeme pro ni napsat rovnici následovně [12]:

$$\tau_w = K \cdot \dot{\gamma}^m \quad (69)$$

Po dosazení za vypočtenou smykovou rychlost a známé hodnoty koeficientu koexistence a indexu toku dostaneme výsledek:

$$\tau_w = 3730 \cdot 1323^{0,61} = 299\,159 \text{ Pa} \quad (70)$$

5.3.3.3 Tlaková ztráta

Tlaková ztráta je rozebrána poněkud detailněji. Je propočítána analyticky, ale i v 3D modelovacím programu Ansys – Fluent. Tento program propočítává jednotlivé body sítě, kterou si v programu pro danou geometrii vytvoříte. Pokud tedy program správně nastavíte, mělo by se z logiky věci dosáhnout mnohem přesnějšího řešení než u vztahů založených na přibližných řešeních.

- ANALYTICKÉ ŘEŠENÍ

U analytického řešení tlakové ztráty kapiláry budeme vycházet, že je tlaková ztráta funkcí tečného napětí, které jsme již vypočítali.

$$\Delta p = \frac{2 \cdot \tau_w \cdot l}{h} \quad (71)$$

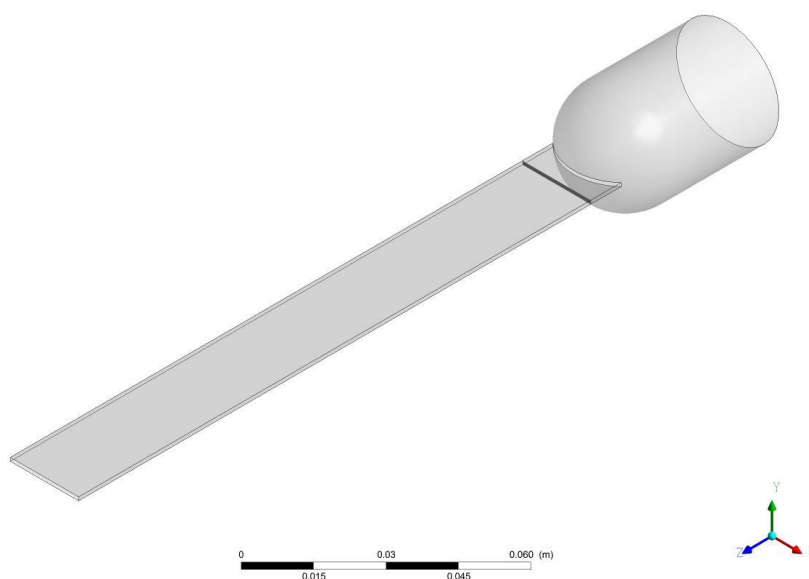
Po dosazení vypočteného tečného napětí a parametrů kapiláry dostaneme výsledek:

$$\Delta p = \frac{2 \cdot 299159 \cdot 0,155}{0,001} = 92739161 \text{ Pa} = 92,7 \text{ MPa} \quad (72)$$

- NUMERICKÉ ŘEŠENÍ

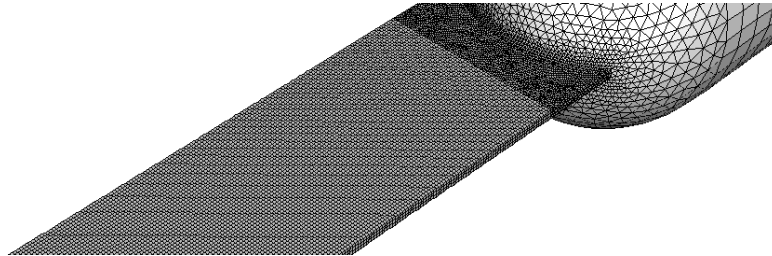
Výsledky numerické analýzy našeho problému získáme a vyobrazíme pomocí programu Fluent od společnosti Ansys, Inc. To je používaný software pro simulování procesů téměř v jakémkoliv inženýrském odvětví. Nabízí virtuální pohled na daný problém a provedení výpočetních analýz. Postup zavedení problému do programu je obvykle ve třech krocích. Nejprve je potřeba nadefinovat geometrii. Tu je možné udělat více způsoby. Máme-li nadefinovanou geometrii přichází na řadu druhý krok a tím je tzv. mešování. Tento počestěný výraz vychází z anglického meshing, což lze přeložit jako ze síťování. Znamená to, že je geometrie rozdělena na konečný počet prvků. Je-li geometrie takto rozdělena, přichází na řadu již poslední krok a tou je definování konkrétních podmínek pro CFD simulaci, což v překladu znamená výpočet dynamiky proudění a její následné zobrazení.

Pro oblast strojírenství je výhodné, že geometrie problému může být vytvořena v jakémkoliv programu, který dokáže udělat výstup v podporovaných formátech programy od společnosti Ansys. Tím je ku příkladu formát souboru s příponou step, což je běžně používaný formát výstupu a téměř každý 3D modelovací program svůj výstup v tomto formátu dokáže uložit. Model pro tuto práci byl ku příkladu vytvořen v programu Autodesk Inventor a jehož vzhled můžeme vidět na obrázku Obr. 28. Geometrie kapiláry viz příloha sestavných výkresů navrhovaných hlav.



Obr. 28: Model kapiláry

Tento obrázek pochází již z prostředí programu Fluent, kdy po vložení modelu byla vytvořena síť a bylo nadefinováno, že stěny geometrie fungují jako hranice pro daný problém a vnitřek modelu jako definice rozměru kapaliny, která štěrbinou prochází. Na obrázku jsou pak vyobrazeny pouze stěny geometrie, pro větší názornost. Obrázek Obr. 29 pak v detailu ukazuje, jak konkrétně vypadá síť vytvořená pro tento daný případ.



Obr. 29: Detail výpočetní sítě kapiláry vytlačovací hlavy

Síť byla strukturována. Převážně bylo použito hexagonálních elementů v rovné části kapiláry a ve vstupním válci do geometrie. V přechodu mezi válcovou částí a obdélníkovou bylo použito tetragonálních elementů. Celkový počet elementů sítě byl 157731. Kvalita sítě z hlediska ortogonální kvality byla 0.16 (1 odpovídá hexagonální síti) minimum právě v přechodové oblasti a parametr Aspect ratio v maximum 14,8 také v přechodové oblasti. Nicméně ve vyšetřované oblasti prostoru kapiláry byla síť plně hexagonální (tedy nejlepší možná z hlediska orientace uzlů vůči toku).

Dále bylo potřeba zavést jednotlivé veličiny a předpoklady a definovat tak programu známé parametry problému. Materiálové hodnoty zadávané do programu odpovídají předpokladu nenewtonské kapaliny, kterou je potřeba zadat všechny tři hodnoty z tabulky 6 pro taveninu HDPE. Mimo materiálové vlastnosti bylo do programu zadáno laminární proudění, které u tavenin polymeru probíhá, což je ověřeno následujícím výpočtem. Vztah Reynoldsova čísla pro mocninovou kapalinu je následující [12]:

$$Re_{MR} = \frac{\rho \cdot \bar{u}^{2-m} D_h^m}{8^{m-1} \cdot K} \quad (73)$$

Z objemového toku vypočítaného rovnicí (67), vypočítáme střední rychlost v kapiláře.

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}}{w \cdot h} = \frac{3,64 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 0,001} = 0,182 \text{ m/s} \quad (74)$$

Charakteristický rozměr D_h se pro Reynoldsovo číslo v tomto případě vypočítá:

$$D_h = \frac{4 \cdot w \cdot h}{2 \cdot (w + h)} = \frac{4 \cdot 0,02 \cdot 0,001}{2 \cdot (0,02 + 0,001)} = 0,0019 \text{ m} \quad (75)$$

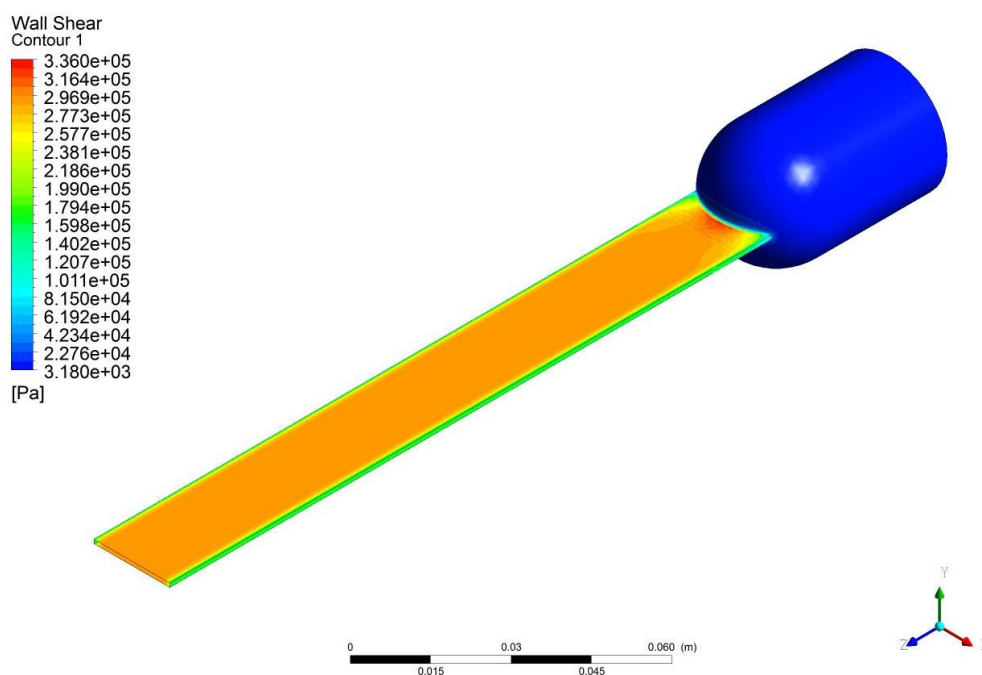
Po dosazení do rovnice (73) nám vyjde:

$$Re_{MR} = \frac{764 \cdot 0,182^{2-0,61} \cdot 0,0019^{0,61}}{8^{0,61-1} \cdot 3730} = 9,5 \cdot 10^{-4} < 2300 \quad (76)$$

Jelikož je hodnota Reynoldsova čísla menší než 2300, které platí pro proudění v uzavřených profilech, jedná se o laminární proudění.

Poté byl již jen nastaven hmotnostní průtok na vstupu do kapiláry, který byl zadán na hodnotu 0,0027 kg/s. Jak již bylo uvedeno výše, tato hodnota odpovídá maximálnímu průtoku zvoleného vytlačovacího stroje. Poslední zadávanou věcí v CFD simulačních programech je jakou metodou bude počítáno. V tomto případě byla použita metoda SIMPLE. Tato metoda spočívá v tom, že na začátku se odhadne tlak, dle něho se spočítají rychlosti ve směru x a y. Tyto rychlosti splňují bilanci hybnosti, ale nikoliv rovnici kontinuity, a proto se ve druhém kroku počítají jejich korekce a korekce tlaku. Tyto korekce se přepočítají na normální tlaky a rychlosti. Zpřesněné tlaky se použijí v prvním kroku a iteračně se přepočítají rychlosti. Takto se to opakuje, dokud nejsou korekce dostatečně malé.

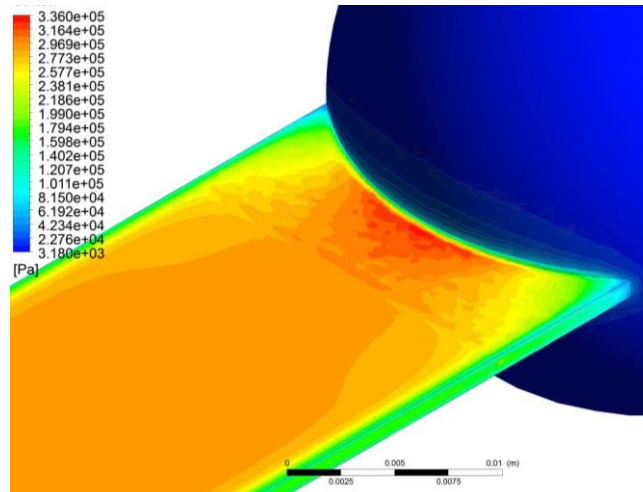
Jelikož ale Fluent nepočítá jenom průběh tlaků. Ukážeme si i další jeho výsledky. Například napětí na stěně, které zobrazuje namáhání součásti na celé ploše dutiny.



Obr. 30: Průběh napětí na stěně kapiláry

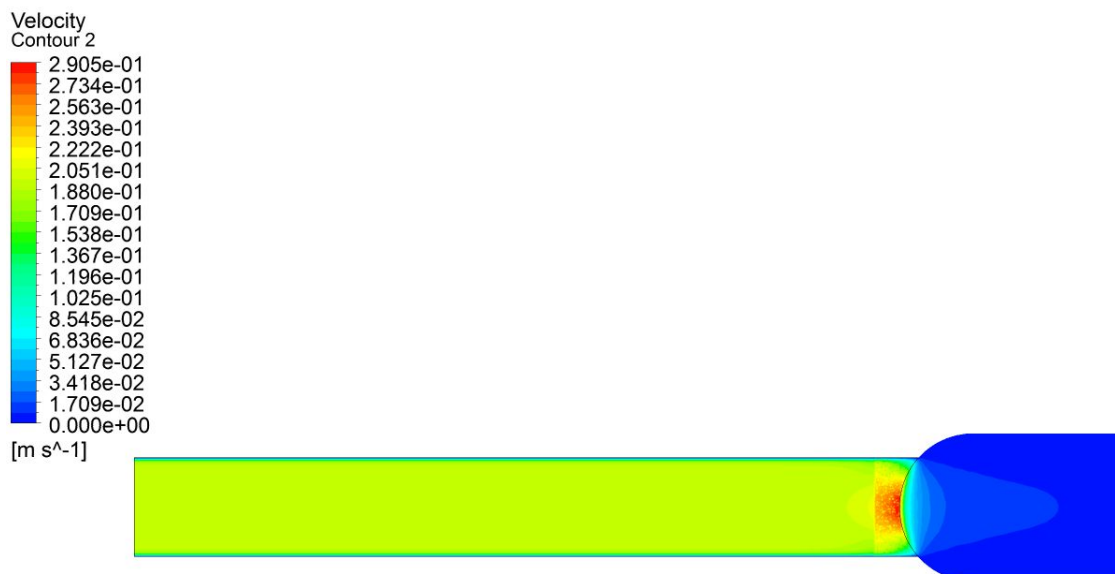
Z obrázku Obr. 30 a Obr. 31 je patrné, že největší zastoupení (barevně) má smykové napětí okolo 297 kPa, což odpovídá vypočtené hodnotě analytickým řešením.

V detailu pak můžeme vidět, že největší napětí vzniká v přechodu mezi prostorem přívodu taveniny a kapiláry, kde je napětí koncentrováno.



Obr. 31: Detail zobrazení napětí na stěně kapiláry

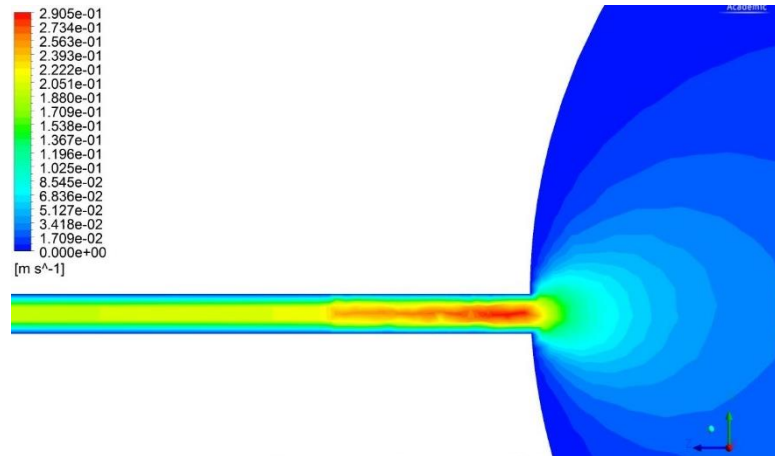
Další vyhodnocovanou veličinou může být vypočítávaná rychlost. Tu lze vyhodnotit například lokálně a vyobrazit barevnou konturou podobně jako napětí.



Obr. 32: Rychlost v půdorysné rovině kapiláry

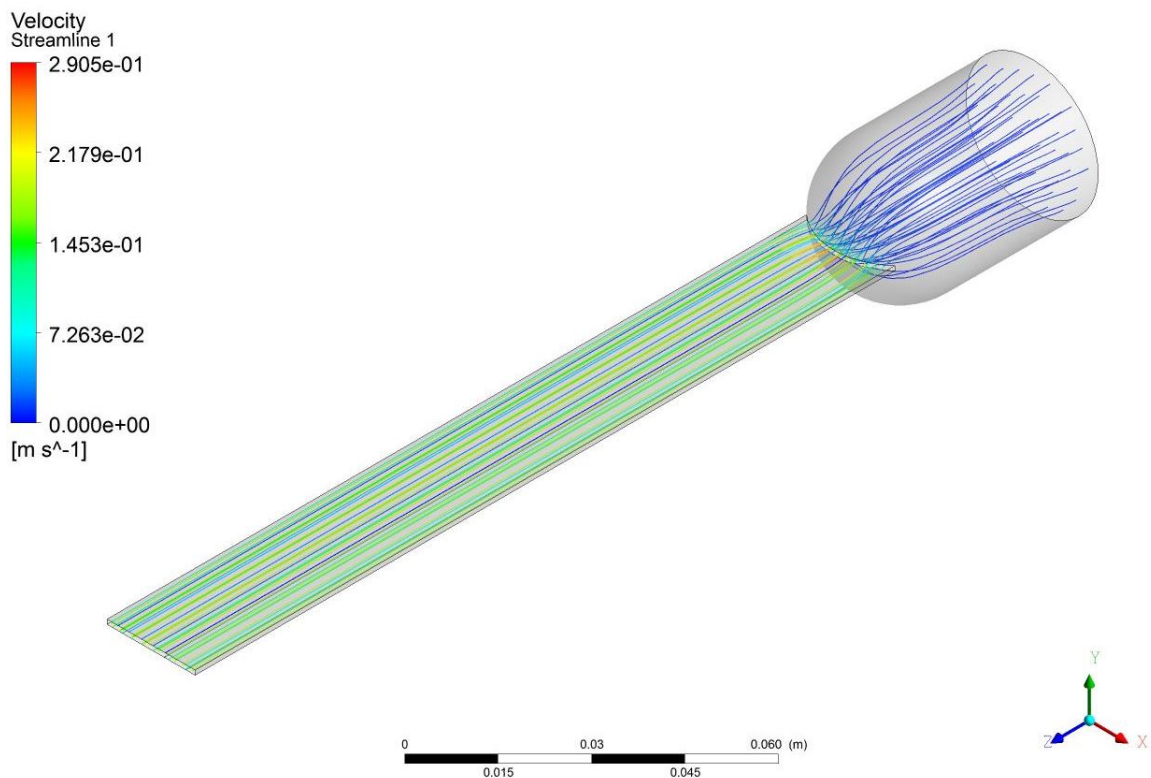
Rovina řezu je vedena v polovině výšky kapiláry. Z obrázku můžeme vyčíst, že maximální rychlost bude dosahovat někde okolo 0,29 m/s, a to znovu v oblasti vstupu do kapiláry. Průměrná rychlost v kapiláře se bude pro daný případ pohybovat v okolí 0,2 m/s, což znovu téměř odpovídá vypočítané průměrné rychlosti, která má hodnotu 0,18 m/s.

Zajímavý je i detailní pohled na podélný řez kapiláry v oblasti přechodu. Rovina řezu je vedena v polovině šířky kapiláry. Zde můžeme vidět, že se tavenina urychluje již před kapilárou.



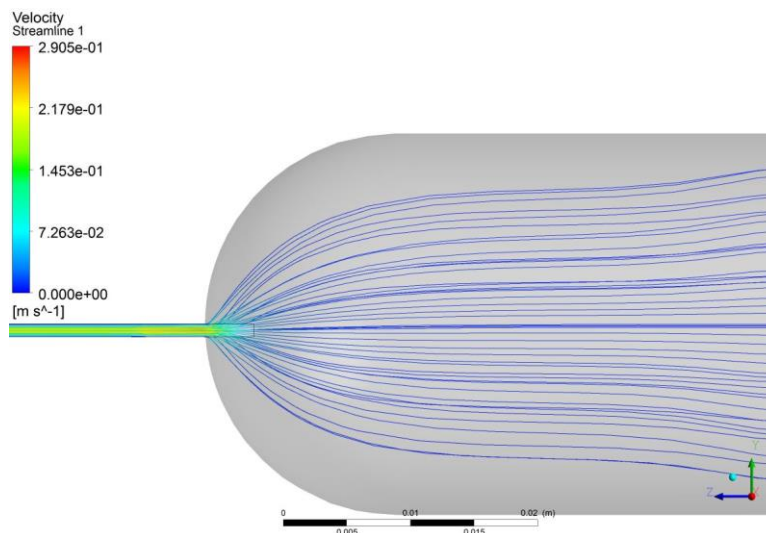
Obr. 33: Detail na místní rychlost v podélném řezu kapiláry

Rychlost, ale lze také vyhodnotit a zanalyzovat směrově. To znamená, jakým způsobem se částice taveniny pohybují. Právě trajektorie pohybu částic může často přinést vysvětlení a pochopení některých jevů, které se v daném problému vyskytují.



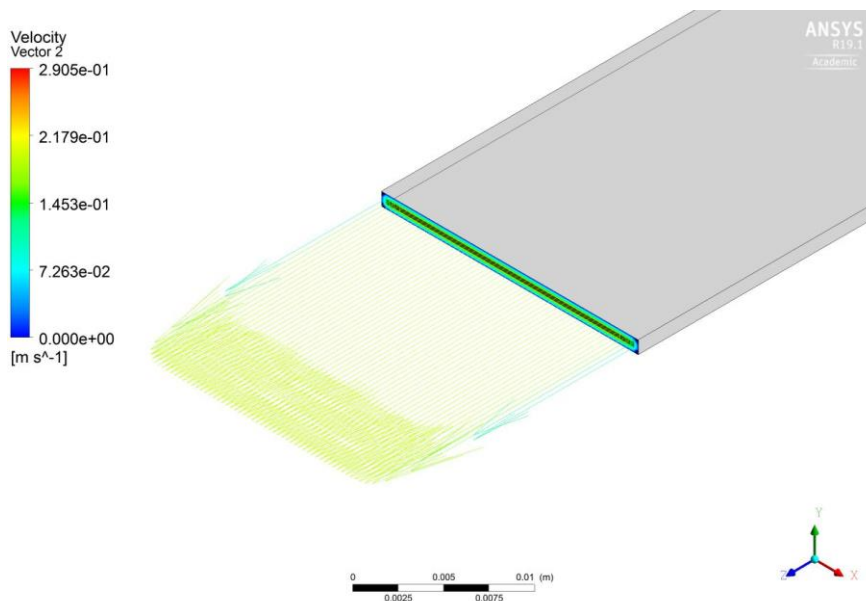
Obr. 34: Trajektorie pohybu částic ve vytlačovací hlavě

Trajektorie částic taveniny polymeru na obrázku Obr. 34 názorně zobrazují průchod materiálu vytlačovací hlavou. Každá trajektorie má proměnnou barvu, která znázorňuje průběh rychlosti.



Obr. 35: Podélný průřez hlavou se zobrazenými trajektoriemi částic

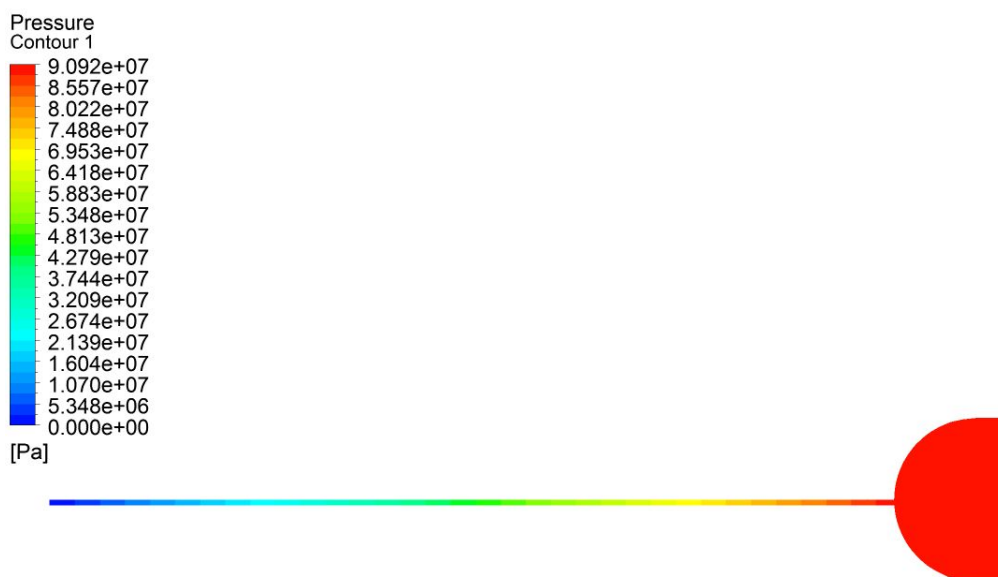
Výše bylo uvedeno, že takovéto obrázky přináší objasnění určitých jevů v daných problémech. Z obrázku Obr. 35 je například zřejmé z jakého důvodu je rychlost částic větší na začátku kapiláry. Je to z důvodu koncentrování částic z většího prostoru do menšího. Částice pak urychlují sami sebe, než se tento jev v kapiláře ve větší vzdálenosti od vstupu do kapiláry znovu ustálí.



Obr. 36: Směry a rychlosti částic na výstupu vytlačovací hlavy

Poslední obrázek týkající se rychlosti proudění ve vytlačovací hlavě se týká směru a rychlosti na jejím výstupu. Šipky vystupující z hlavy představují směr proudění, ale také rychlost. To jednak svojí velikostí, ale i barvou. Můžeme si tedy všimnout, že na obou okrajích kratších stran štěrby jsou rychlosti o něco pomalejší než v jejím středu.

Pro porovnání s analytickým řešením tlakové ztráty kapiláry si ještě ukážeme, jakého průběhu tlaků se v kapiláře dosahuje dle Fluentu. To nám ve výsledku znázorní tlakovou ztrátu vypočítanou numerickým řešením.



Obr. 37: Rozložení tlaku v kapiláře

Z obrázku rozložení tlaku v kapiláře můžeme vidět, že tlak lineárně klesá od vstupu až k jejímu výstupu. Na levé straně obrázku je zobrazena osa, která přiřazuje jednotlivé barvě zobrazené v kapiláře její hodnotu tlaku. Jelikož je tlak okolí nastaven na nulovou hodnotu, můžeme rovnou z osy odečíst tlakovou ztrátu kapiláry, která odpovídá maximální hodnotě tlaku. V opačném případě bychom od této hodnoty museli odečíst tlak okolí, který je nejčastěji barometrický.

Tlaková ztráta dle numerického výpočtu provedeném v programu ANSYS Fluent tedy je 90,9 MPa. V porovnání s analytickým řešením, kdy tlaková ztráta vyšla 92,7 MPa, nejsou výsledky příliš odlišné.

5.4 Dílčí závěr kapitoly

Byly předloženy 3 koncepty tvaru vytlačovací hlavy pro daný tvar kapiláry. Z nich byla vybrána nejvhodnější varianta. Všechny koncepty byly rozkresleny v sestavných výkresech, které jsou uvedené v přílohách. Hlava je složena ze dvou dílů, které jsou spojeny deseti šrouby M10 z materiálu 8.8. Byla provedena pevnostní kontrola šroubů na míjivé zatížení v tahu a šrouby pevnostně vyhovují. Dále byla vypočtena tepelná ztráta hlavy, která činí 33 W. Pro maximální průtok taveniny zvoleného polymeru (HDPE) a extrudér firmy BOCO byla spočítána analyticky tlaková ztráta hlavy (byl uvažován mocninový model), která je 92,7 MPa. Kontrolní výpočet toku taveniny byl proveden simulací v programu ANSYS, kde tlaková ztráta pro stejné parametry toku a geometrii činila 90,9 MPa. Odchylka výsledku CFD programu od analytického řešení činila 1,9 %.

6 Reologické měření na extrudéru

Před dokončením této diplomové práce se do školy extrudér podařilo pořídit, což v tomto omezeném čase nabízelo provést, alespoň jedno měření reologický vlastností materiálu, který byl použit při předání stroje.

Jednalo se o materiál TPE (materiálový list viz příloha), což je termoplastický elastomer. V materiálových listech nebyla hustota taveniny, ale v internetových zdrojích se jí podařilo najít v tabulce společně s jinými podobnými materiály. Hodnoty hustot tavenin materiálů je obvykle obtížné najít, a proto je tabulka vložena na následující straně. Teplota taveniny byla 200 °C.

DENSITY VALUES – SELECTED RESINS		
MATERIAL	70°F DENSITY gr/cc	MELT DENSITY gr/cc
ABS (INJECTION GRADE)	1.05	0.97
ABS 30% GR	1.28	
ACETAL	1.42	1.17
ACETAL 20% GF	1.55	
ACRYLIC GENERAL PURPOSE)	1.16	1.04
CELLULOSE ACETATE	1.26	1.13
CELLULOSE BUTYRATE	1.20	1.07
CELLULOSE PROPIONATE	1.22	1.10
ETHYLENE VINYL ACETATE	0.95	
IONOMER	0.95	0.73
NYLON 6/6	1.14	0.97
NYLON 6	1.13	0.97
NYLON 6/10	1.08	0.97
NYLON 6/12	1.07	0.97
NYLON 11	1.04	0.97
NYLON 12	1.02	0.97
NYLON 30% GF	1.36	
POLYBUTYLENE	0.92	
POLYCARB/ESTER ALLOY	1.20	
POLYCARBONATE	1.20	1.02
POLYCARBONATE 30% GF	1.42	
CO-POLYESTER PETG	1.27	1.12
CO-POLYESTER PCTG	1.24	1.08
POLYESTER PBT	1.34	1.11
POLYEST PBT/PET 30% GF	1.58	
POLYESTER PET (BOTTLE)	1.40	1.20
POLYETHERIMIDE	1.27	
POLYETHYLENE LOW DENSITY	0.92	0.76
POLYETHYLENE MEDIUM DENSITY	0.92-0.94	0.74
POLYETHYLENE HIGH DENSITY	0.94-0.97	0.72
POLYTHYL 30% GF HDPE	1.18	
PPO/STYRENE (NORYL)	1.07	0.90
POLYPHENYLENE SULFIDE	1.35-1.80	
POLYPHEN SULFIDE 40% GF	1.65	
POLYPROPYLENE	0.90	0.70
POLYPROPYLENE 30% GF	1.13	
POLYSTYRENE GP	1.05	0.97
POLYSTYRENE IMPACT MOD	1.04	0.96
POLYSULFONE	1.25	1.16
POLYURETHANE	1.20	1.13
PVC – RIGID	1.39	1.30
PVC – PIPE	1.44	1.32
PVC – FLEXIBLE	1.29	1.20
SAN	1.08	1.00
T/P RUBER (SANTOPRENE)	1.08	1.00
T/P ELASTOMER (URETHANE)	0.97	0.93
	0.83	0.82

Tab. 8: Hodnoty hustot tavenin jednotlivých materiálů [11]

Měření spočívalo v měření otáček extrudéru a zapisování hodnot tlaků z tlakoměrů na vytlačovací hlavě (p_c – tlak u ústí kapiláry, p_b – tlak na vstupu do kapiláry), hmotnosti vytlačeného materiálu a času za který byla daná hmotnost vytlačena pro konstantní hodnotu otáček. Naměřeny byly tyto hodnoty:

p_c	p_b	m_t	t	n
[bar]	[bar]	[g]	[sec]	[1/min]
16,5	107,5	68,96	427,18	10
17	123,5	183,74	380,22	25
19	142	206,29	186,02	50
20	149	207,90	125,49	75
20,5	156,5	201,06	89,49	100

Tab. 9: Tabulka naměřených hodnot

Naměřená data byla přepočítána, aby se dále mohla vyhodnocovat tímto vztahem pro tlakovou ztrátu:

$$dp = p_b - p_c \quad (77)$$

dp	dm_t/dt	dV/dt
[Pa]	[kg/s]	[m ³ /s]
9100000	1,61E-04	1,74E-07
10650000	4,83E-04	5,20E-07
12300000	1,11E-03	1,19E-06
12900000	1,66E-03	1,78E-06
13600000	2,25E-03	2,42E-06

Tab. 10: Tabulka přepočítaných hodnot

Pro vyhodnocení materiálových vlastností jsou potřeba znát rozměry kapiláry, které jsou uvedeny například v tabulce 7. Pro tok mocninové kapaliny mezi dvěma deskami, které mají poměr výšky ku šířce mnohem menší než 1 platí:

- Smyková rychlost [12]

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \dot{V}}{b \cdot h^2} \cdot \left(2 + \frac{1}{m}\right) \quad (78)$$

- Tečné napětí [12]

$$\tau = \frac{h \cdot dp}{2 \cdot L} \quad (79)$$

kde L v tomto případě představuje vzdálenost mezi tlakovými snímači.

K vyhodnocení materiálových vlastností dané látky využijeme rovnice mocninové kapaliny v závislosti tečného napětí τ na smykové rychlosti γ v obecném tvaru [12].

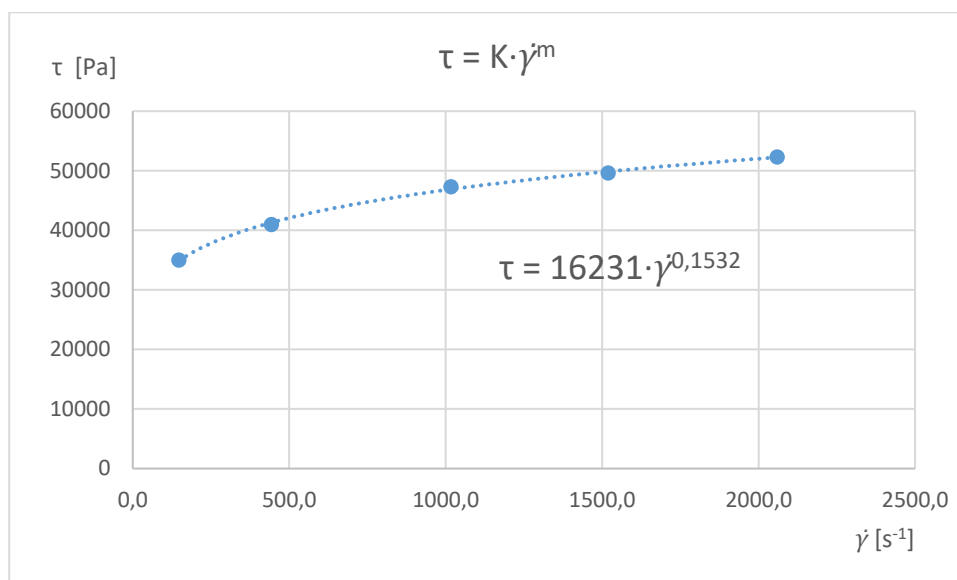
$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^m \quad (80)$$

Z rovnic (78) a (79) vypočteme jednotlivé body závislosti pro konkrétní otáčky šneku abychom si mohli vykreslit graf.

$\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	τ [Pa]
148,0	35000
443,1	40962
1016,8	47308
1519,1	49615
2060,1	52308

Tab. 11: Vypočtené body závislosti mocninové kapaliny

Vložením těchto bodů do grafu a jejím proložením mocninovou funkcí dostaneme přesně hodnoty z obecné rovnice mocninové kapaliny. Těmi jsou K, což je koeficient koexistence a n představuje index toku kapaliny.



Obr. 38: Graf závislosti mocninové kapaliny

Z grafu můžeme vyčíst, že koeficient koexistence pro TPE je $K=16231 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$. Index toku odpovídá hodnotě $m = 0,15$.

6.1 Dílčí závěr kapitoly

Stroj s reologickou hlavou se v časovém rámci řešení práce podařilo pořídit, proto bylo možné provést prvotní experimenty s reologickou hlavou. Byly proměřeny tokové vlastnosti materiálu TPE, pro pět různých otáček šneku resp. pět bodů reogramu. Z této závislosti byly vyhodnoceny parametry mocninového modelu taveniny, a to index toku $m=0,15$ a koeficient koexistence $K \cong 16200 \text{ Pa}\cdot\text{s}^m$ pro teplotu taveniny $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Tímto experimentem byla ověřena metodika měření a vyhodnocení a funkčnost navržené hlavy.

6.2 Použité přístroje

- Extrudér: BOCOMATIC EB30, BOCO Parbubice, ČR
- Vlastní koncepce reologické hlavy
- Tlakové snímače Dyniser MDT460F-1/2-1M-15-SIL2
- Váhy: AND HF-200G
- Digitální stopky

Závěr

V rešeršní části této práce se zabírám procesy okolo technologie vytlačování, vytlačovacím strojem a jeho možnými konfiguracemi včetně jeho nedůležitějších komponent, kterým je šnek a vytlačovací hlava. Tyto dvě komponenty jsou v další části práce navrhovány a počítány.

Při návrhu šneku vyšlo z výsledků výpočtů najevo, že pakliže chceme používat vytlačovací stroj na vytlačování tavenin plastů se dvěma snímači na vytlačovací hlavě, je nutné navrhnout šnek s kompresní zónou a doplňkovými sekcemi, které zvyšují tlak dosažený na konci šnekového čerpadla. Pro základní šnek bez kompresní části vyšel tlak pro daný polymer HDPE 11,26 MPa. Přitom tlaková ztráta hlavy vypočítaná programem Ansys Fluent vyšla 90,9 MPa. Znamená to, že navrhovaný šnek, který byl počítán pro ideální izotermní a adiabatické podmínky, by nepřekonal tlakovou ztrátu vytlačovací hlavy a daný materiál by hlavou neprošel.

Výsledkem navrhování vytlačovací hlavy se dospělo k závěru, že pro tlaky, které dosahují desítky megapascal je potřeba, aby vytlačovací hlava měla v oblasti kapiláry dostatečný průměr a bylo možné ji osadit šrouby, které splňují pevnostní požadavky.

U reologického vyhodnocování použitého materiálu je pouze škoda, že již z časových důvodů nebylo možné vyhodnotit ve všech částech diplomové práce stejný materiál. Nicméně i toto měření a vyhodnocení si materiálových vlastností ať už jakéhokoliv materiálu je velmi přínosné.

Seznam použitých symbolů

znak	popis	jednotka
a	koeficient izotermní charakteristiky	[-]
a_0	konstanta koeficientu izotermní charakteristiky	[-]
A	konstanta součinitele vlivu křivosti	[-]
b	koeficient lineární tepelné roztažnosti	K^{-1}
c	Měrná tepelná kapacita taveniny HDPE	$J/(kg.K)$
d	průměr šroubovice	mm
d_d	průměr dřívku šroubu	mm
d_1	průměr jádra	mm
D	průměr tavicí komory	mm
D_h	charakteristický rozměr pro Reynoldsovo číslo	[m]
dp	tlaková diference	Pa
dm_t	hmotnostní diference	kg
dt	časová diference	s
dV	objemová diference	m^3
e	tloušťka šroubovice	mm
F	síla vzniklá ve šroubu	N
F_c	celková síla způsobená tlakem	N
F_d	korekční součinitel vlivu bočních stěn pro unášivé proudění	[-]
F_{dc}	korekční součinitel vlivu křivosti pro unášivé proudění	[-]
F_p	korekční součinitel vlivu bočních stěn pro plouživé proudění	[-]
F_{pc}	korekční součinitel vlivu křivosti pro plouživé proudění	[-]
h	výška kapiláry	mm
k	bezpečnost	[-]
K	koeficient koexistence	$Pa.s^m$
k_d	součinitel vlivu vůle pro unášivé proudění	[-]
k_h	koeficient vytlačovací hlavy	[-]
k_p	součinitel vlivu vůle pro plouživé proudění	[-]
l	délka kapiláry	mm
L	délka šneku	mm
L_h^*	Bezrozměrný charakteristický rozměr hlavy	[-]
m	index toku	[-]
m_t	hmotnost	g
n	otáčky šneku	s^{-1}
N	počet šroubů	[-]
n^*	bezrozměrné otáčky	[-]
p	střední tlak v kapiláře	MPa
P	výkon extrudéru	kg/h
p_b	tlak na vstupu do kapiláry	bar
p_c	tlak v ústí kapiláry	bar
Δp	tlaková ztráta	Pa
Δp^*	bezrozměrný tlak	[-]
Q	teplo	W
R_1	Poloměr kapiláry	m
R_2	Poloměr hlavy	m
Re_{MR}	Reynoldsovo číslo	[-]
s	rozteč šroubovice	mm
S	plocha	m^2
T_o	teplota okolí	K

znak	popis	jednotka
T_{S_1}	teplota taveniny	K
T_{S_2}	teplota stěny hlavy	K
T^*	bezrozměrná teplota závislá na délkových souřadnicích	[-]
T_0^*	bezrozměrná teplota na počátku	[-]
\bar{u}	střední rychlost v kapiláře	m/s
\dot{V}	objemový průtok	m ³ /s
\dot{V}^*	bezrozměrný objemový průtok	[-]
w	šířka kapiláry	mm
α	součinitel přestupu tepla	W/(m ² .K)
β	koeficient izotermní charakteristiky	[-]
β_0	konstanta koeficientu izotermní charakteristiky	[-]
γ	Parametr příkonové charakteristika	[-]
γ_0	parametr příkonové charakteristiky v kanále šneku	[-]
γ_c	parametr příkonové charakteristiky ve štěrbině šneku	[-]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost	s ⁻¹
κ	konstanta součinitele vlivu křivosti	[-]
λ	tepelná vodivost	W/(m.K)
μ	dynamická viskozita taveniny	Pa.s
π	Ludolfovo číslo	[-]
ρ	hustota taveniny HDPE	kg/m ³
σ	konstanta součinitele vlivu křivosti	[-]
σ_k	mez kluzu	MPa
σ_D	dovolené napětí	MPa
σ_t	tahové napětí šroubu	MPa
τ	tečné napětí	Pa
τ_w	tečné napětí na stěně	Pa
φ_s	Úhel stoupání šroubovice	rad
φ_t	Třecí úhel šneku	rad

Použité zdroje a literatura

- [1] KUTA, Antonín. *Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999. ISBN 978-80-7080-367-7.
- [2] OSSWALD, Tim A. *International plastics handbook: the resource for plastics engineers*. [1st ed.]. Cincinnati: Hanser, c2006. ISBN 9783446229051.
- [3] AUSPERGER, Aleš. *Technologie zpracování plastů* [online]. [cit. 2018-10-30]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Cover.html>
- [4] ŠTĚPEK, Jiří, Antonín KUTA a Jiří ZELINGER. *Technologie zpracování a vlastnosti plastů: celostátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy chemickotechnologické, studijní obor 28-10-8 Technologie výroby a zpracování polymerů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [5] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. 2015. [cit. 2018-10-30]. ISBN 978-80-88058-71-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/14.html#14-1>
- [6] PECINA, Pavel a Josef PECINA. *Materiály a technologie - plasty*. Brno: Masarykova univerzita, 2006. ISBN 80-210-4100-5.
- [7] BĚLOHRÁDEK, Luboš. *Polymery* [online]. [cit. 2016-08-02]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [8] Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti. In: *Technická univerzita v Liberci fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. [cit. 2016-08-02]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [9] Plasty. In: *Západočeská univerzita v Plzni fakulta strojní: Oddělení povrchového inženýrství* [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <http://www.ateam.zcu.cz/plasty.pdf>
- [10] Plasty. In: *Vyšší odborná škola zdravotnická s Střední zdravotnická škola Hradec Králové* [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: <http://ptc.zshk.cz/vyuka/plasty.aspx>
- [11] *Stelray plastic products, Inc.: Plastic Material & Draft Angle Reference Charts* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://www.stelray.com/reference-tables/>
- [12] CHHABRA, R. P. a J. F. RICHARDSON. *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 07-5068532-8.
- [13] *POTOP Experimental Analysis Instrument Co.,Ltd.* [online]. [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://www.potop-lab.com/169-mini-laboratory-single-screw-extruder.html>
- [14] *BVV Veletrhy Brno, a.s.* [online]. [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <https://www.bvv.cz/msv/aktuality/boco-pardubice-machines-sro4/>

- [15] *INEOS Group AG* [online]. [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-olefins-and-polymers-usa/products/technical-information--patents/ineos-typical-engineering-properties-of-hdpe.pdf>
- [16] KRATEJL, Daniel. *Tokové vlastnosti tavenin polymerů*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.

Seznam příloh

číslo	název	počet stran	formát
P1	Sestavný výkres konceptu hlavy 1	1	A4
P2	Sestavný výkres konceptu hlavy 2	1	A4
P3	Sestavný výkres konceptu hlavy 3	1	A4
P4	Materiálový list TPE	2	A4
P5	Výpočet šneku v programu Excel	1	A4