

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY**

**VYTLAČOVACÍ HLAVA PRO VYFUKOVÁNÍ
VLÁKEN Z TAVENINY POLYMERU**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

ONDŘEJ VOLF

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

V Praze dne

..... Jméno a Příjmení

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Volf** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **478236**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vytlačovací hlava pro vyfukování vláken z taveniny polymeru

Název bakalářské práce anglicky:

Die for melt-blown technology

Pokyny pro vypracování:

Pro výrobu nanovláken existují mnoho technologických postupů. Zaměřte se na melt-blown technology, tedy vyfukování vláken z taveniny polymeru. Navrhněte hlavu pro výrobu zadaného množství nanovláken.

- 1) Proveďte literární rešerši na téma výroba nanovláken a zaměřte se na technologii melt-blown a vhodné materiály pro tuto technologii.
- 2) Proveďte návrh vytlačovací hlavy včetně procesních a pevnostních výpočtů a návrhu vhodných materiálů.
- 3) Vytvořte 3D model hlavy a výkres sestavy hlavy včetně kusovníku.

Seznam doporučené literatury:

Huten M.I., 2016: Handbook of Nonwoven Filter Media, Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2016, ISBN: 978-0-08-098301-1.
Lim H., 2010: A Review of Spunbond Process, JTATM, 6(3).
Brünler R., et al., 2016: Smart Textiles and their Applications, 2016, Woodhead Publishing, ISBN 978-0-08-100574-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **19.09.2021**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Za odborné vedení, vstřícnost a cenné rady při psaní mé bakalářské práce děkuji doc. Ing. Janovi Skočilasovi, Ph.D.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Ondřej

Příjmení autora: Volf

Název práce česky: Vytlačovací hlava pro vyfukování vláken z taveniny polymeru

Název práce anglicky: Extrusion head for melt-blown technology

Rozsah práce: počet stran: 57
počet obrázků: 24
počet tabulek: 5
počet příloh: 1

Akademický rok: 2020/2021

Jazyk práce: Český

Ústav: Ústav procesní a zpracovatelské techniky

Studijní program: Teoretický základ strojírenského inženýrství

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

Anotace česky:

Bakalářská práce se zabývá procesem vyfukování nanovláken pomocí melt-blown technologie a popisem používaného extrudéru. Představuje nejen zpracovatelský stroj, ale i výběr vhodných materiálů či specifika technologie v souvislosti s vytlačovací hlavou. Výsledkem práce je zjednodušený návrh hlavy včetně výpočtů, výrobních kritérií a sestavových výkresů.

Anotace anglicky:

The bachelor thesis deals with the process of nanofibers production using melt-blown technology and the description of the used extruder. It presents not only the processing machine, but also the selection of suitable materials or the specifics of the technology in relation to the extrusion head. The work results in a simplified design of the head including calculations, manufacturing criteria and assembly drawings.

Klíčová slova: extrudér, nanovlákná, melt-blown technologie, hlava, design, nenewtonské kapaliny, polymer

Klíčová slova anglicky: extruder, nanofibers, melt-blown technology, die, design, nonnewtonian fluids, polymer

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. TEORETICKÁ ČÁST	9
2.1. STROJE A NÁSTROJE	9
2.1.1. <i>Extrudér</i>	9
2.1.2. <i>Šneková hřídel</i>	11
2.2. TECHNOLOGIE.....	13
2.2.1. <i>Melt-blown technologie</i>	13
2.2.1.1. <i>Dávkovací čerpadlo.....</i>	13
2.2.1.2. <i>Hlava</i>	14
2.2.1.2.1. <i>Distribuční kanál</i>	14
2.2.1.2.2. <i>Zvláknovací tryska</i>	15
2.2.1.2.3. <i>Vzduchové rozvody.....</i>	16
2.2.1.3. <i>Melt-blown nanovláknna</i>	17
2.2.1.4. <i>Melt-blown technologie a procesní vady</i>	17
2.2.2. <i>Spunbond technologie.....</i>	19
2.3. NENEWTONSKÉ KAPALINY	20
2.4. VHODNÉ POLYMERY.....	22
2.5. REOLOGIE TAVENÝCH POLYMERŮ	23
2.5.1. <i>Power-law model (mocninový).....</i>	23
2.5.2. <i>Carreaův model</i>	26
2.5.3. <i>Crossův viskózní model</i>	26
2.5.4. <i>Elissův model.....</i>	27
2.6. GEOMETRIE DISTRIBUČNÍHO KANÁLU.....	28
2.7. PRŮTOK.....	29
2.7.1. <i>Distribuční kanál a škrťící komora</i>	29
2.7.2. <i>Kapilára.....</i>	30
2.8. TLAKOVÉ ZTRÁTY	33
2.8.1. <i>Distribuční kanál a škrťící komora</i>	33

2.8.2. <i>Kapilára</i>	33
3. PRAKTICKÁ ČÁST	35
3.1. EXTRUDÉR	36
3.2. MATERIÁL	37
3.3. NÁVRH HLAVY	37
3.3.1. <i>Zvlákňovací tryska – kapiláry</i>	37
3.3.2. <i>Distribuční kanál</i>	39
3.3.3. <i>Tlakové ztráty</i>	40
3.3.4. <i>Tepelné ztráty</i>	43
3.3.5. <i>Pevností výpočty</i>	46
3.3.6. <i>Výrobní materiál hlavy</i>	49
3.3.7. <i>Montáž hlavy</i>	50
4. ZÁVĚR	52
5. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	53
6. POUŽITÁ LITERATURA	55
7. SEZNAM PŘÍLOH	57

1. ÚVOD

Zpracování polymerních materiálů je dnes jedním z nejdůležitějších průmyslových odvětví. Jednou ze základních možností zpracování těchto plastů je extruze, při které dochází k plastifikaci materiálu, který je následně protlačován vytlačovací hlavou do požadované podoby [1]. Bakalářská práce se zaměřuje konkrétně na zpracování polymerů pomocí melt-blown technologie, při které je materiál vytlačován a následně horkým vzduchem vyfukován do podoby mikro či nanovláken. Práce je rozdělena do dvou základních částí: teoretické a praktické.

V první části práce představím vytlačovací stroj a jeho jednotlivé komponenty. Pozornost budu věnovat především popisu vytlačovací hlavy, která je klíčová pro výrobu polymerních vláken a která je také ústředním tématem druhé poloviny práce. Věnovat se budu popisu melt-blown technologie, jejího fungování a možných procesních vad. Podrobněji představím jednotlivé polymery a jejich fyzikální i tokové vlastnosti. Závěrem teoretické části se zaměřím na geometrii distribučního kanálu a popis kapilár, kterými se polymerní tavenina vytlačuje.

Cílem praktické části práce bude navrhnout a představit vytlačovací hlavu, která bude funkční pro melt-blown technologii v extrudéru BOCO EB-L 30, jež je k dispozici ve školních laboratořích. V rámci praktické části se pokusím o komplexní představení návrhu vytlačovací hlavy i s potřebnými výpočty. Prvně se zaměřím na procesní aspekty, jakými jsou návrh geometrie kapilár a distribuční hlavy či výpočty tlakových a tepelných ztrát. Popíši výběr vhodného materiálu vytlačovací hlavy, pevnostní výpočty i postup její montáže. V příloze bakalářské práce budou také sestavové výkresy hlavy.

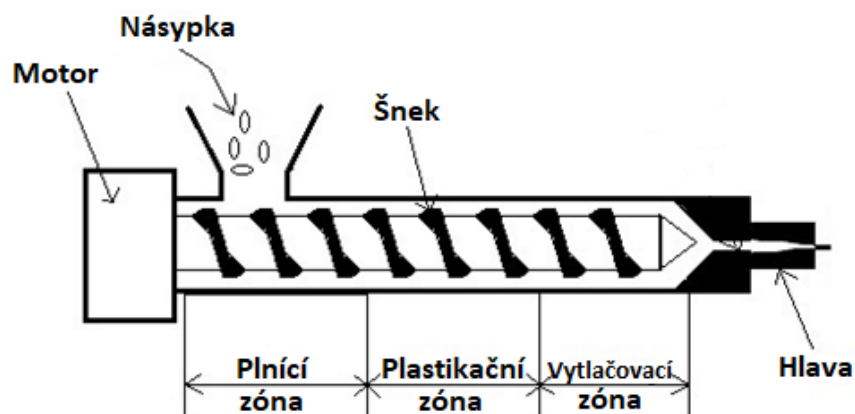
2. TEORETICKÁ ČÁST

„Vytlačování je technologická operace, při které je tavenina plastu kontinuálně vytlačována přes vytlačovací hlavu do volného prostoru“ [2]. Vyrábět lze touto metodou například trubky, fólie, desky či vlákna. Každý konečný tvar nebo polotovar má však odlišné výrobní postupy [2]. Na následujících stránkách představím technologii výroby vláken pomocí melt-blown technologie. Ta se na rozdíl od jiných technologií vytlačování liší tím, že je do výroby přidán proces vyfukování pomocí horkého vzduchu.

2.1. STROJE A NÁSTROJE

2.1.1. Extrudér

Extrudér/vytlačovací stroj je přístroj používaný k tavení látek, zpravidla polymerů, a jejich dopravení do dávkovací části [3]. Jeho součástí je pevný rám, pohon a rotující šneková hřídel, která slouží k protlačení látek několika ohřívacími fázemi znázorněna na obrázku 1. Je důležité, aby jednotlivé části měly rozdílné teplotní podmínky, které jsou jednotlivě přizpůsobené výrobnímu procesu. V ocelovém válci, kterému se v praxi přezdívá plastifikační komora, rotuje takzvaný šnek. Poměr mezi délkou šneku a jeho průměrem by měl být 20–40 [4].



Obr. 1 Schéma extrudéru [5]

Polymer, obvykle ve formě kuliček, pelet, třísek nebo granulí, se gravitací přivádí z násypky do extrudéru. Pro zlepšení finálních vlastností tavenin se může polymer míchat se stabilizátory, barevnými směsmi, modifikátory pryskyřic nebo dalšími přísadami [6].

Extrudér má většinou tři různé zóny: plnicí zónu, plastifikační zónu a vytlačovací zónu. V plnicí zóně se polymerní směs předeřívá. Polymer je poté dopraven do plastifikační zóny, kde je stlačen, homogenizován a zbaven přebytečného vzduchu. Nakonec je polymer dopraven do vytlačovací zóny, kde je tlak polymeru největší, aby byl umožněn přechod do dávkovacího čerpadla či speciální hlavy [7]. Čím dál častěji se používají také tzv. dvoušnekové extrudéry. Jejich dva šneky pracují v komoře připomínající tvar ležaté osmičky. Otáčet se v ní mohou protiběžným nebo souhlasným směrem, tak aby do sebe jejich závity zapadaly [4].

Výhodou těchto strojů je jejich použití pro homogenizaci taveniny, mají totiž vysoký míchací účinek a velmi kvalitně promíchají také materiál, který se skládá z více složek. Naopak jejich nevýhodou je především to, že tavenina se nedopravuje a nevytéká vždy pravidelně [4].

Extrudéry se liší nejen svou velikostí, ale i průměrem šneku. Právě na něm závisí, kolik materiálu dokáže za určitý čas zpracovat. Obecnou snahou je, aby byl materiál ve stroji krátkou dobu, protože obvykle při vystavení materiálu vysokým teplotám na dobu delší než zhruba 10 minut může dojít k jeho degradaci [4]. U ústí extrudéru se nachází filtrační součástka (síto a lamač), která pomáhá kontrolovat tlak a odstraňovat nečistoty, cizí a kovové částice či polymerní hrudky [7].

2.1.2. Šneková hřídel

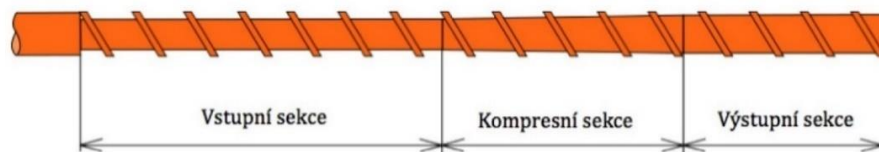
Šneková hřídel má v extrudéru hned několik funkcí: 1) doprava, 2) stlačení a 3) homogenizace materiálu. Po celé délce plastifikační komory se musí v tavenině vytvořit natolik velký tlak, aby tavenina prošla vytlačovací hlavou. Šneky lze dělit do dvou kategorií:

- a) obyčejné, které „mají stejné stoupání závitu i stejnou hloubku drážky po celé délce šneku.“ V případě konstantního stoupání závitu šneku se udává kompresní poměr jako poměr hloubky drážky ve vstupní sekci vůči hloubce drážky na výstupu [4].
- b) diferenciální, které mají profil nerovnoměrný. Ten je charakterizován „kompresním poměrem, který udává poměr objemu jednoho stoupání závitu šneku na vstupu k objemu závitu na výstupu“ [4].

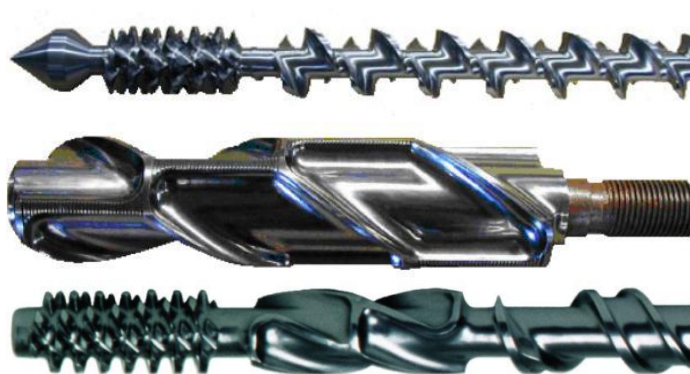
Nejčastěji používaná šneková hřídel sloužící k extruzi termoplastů je rozdělena na tři oddělené sekce. Ty jsou od sebe odlišeny především hloubkou drážky. Vstupní sekce zajišťuje prvotní zahřátí polymerních granulí, a tudíž hloubka drážky musí být kvůli jejich velikosti a prozatímní nepoddajnosti největší. V druhé sekci je dominantní proces komprese. Materiál se intenzivně stlačuje a zahřívá. Právě v této sekci dochází k úplné přeměně na taveninu. Hloubka drážky je proto v porovnání se vstupní sekci menší. Třetí a poslední sekce je odpovědná za úplnou homogenizaci, a tak je hloubka drážky nejmenší. Protože existuje velké množství polymerů s různými charakteristikami, neexistuje univerzální šnek použitelný na všechny polymery. Proto bylo navrženo mnoho odlišných šneků pro různé typy polymeru [4].

Existuje mnoho polymerů, které jsou vhodné pro extruzi [7].

Běžné	Ostatní
Polypropylen	Ethylenvinylacetát
Polystyren	Polychlorotrifluoroethylen
Polyester	Ethylenvinylalkohol
Polyuretan	Polyvinylalkohol
Nylon 6, 66, 11, 12	Polymethylpentene
Polyethylen (Nízké i vysoké hustoty)	Polybutylen terephthalate
Polykarbonát	tavitelné kopolymery



Obr. 2 Sekce šneku [8]



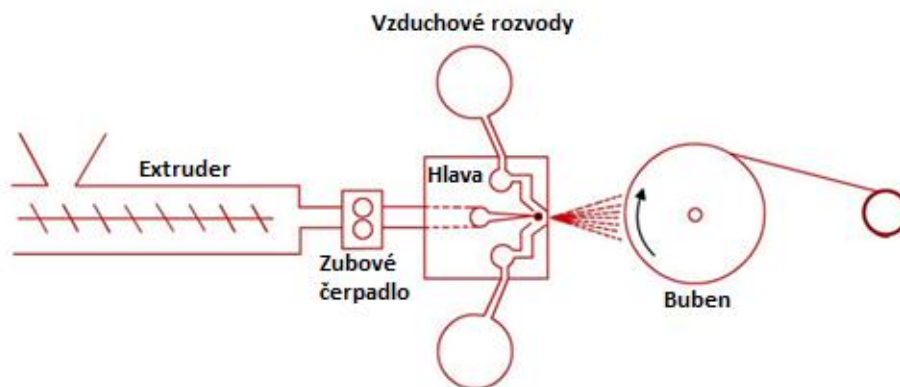
Obr. 3 Typy sekčí a přidavných zón šneku [8]

2.2. TECHNOLOGIE

2.2.1. Melt-blown technologie

Melt-blown technologii by se v českém jazyce nejlépe podobal volný překlad „foukání taveniny“. Jedná se o proces výroby nanovláken z roztaveného polymeru pomocí vysoké rychlosti vzduchu. Roztavený a homogenizovaný polymer, jakožto produkt extruze, je přiveden do hlavy extrudéru specializované pro melt-blown technologii [3]. Vzhledem ke konstrukci zařízení je výsledným produktem tkanina složená ze sítě náhodně poskládaných vláken [9].

Obecně se proces výroby nanovláken skládá ze tří hlavních komponentů: extrudér, dávkovací čerpadlo, speciální hlava. Na ně navazuje proces zhotovení vláken a jejich navíjení [9]. Polymer se přivádí do extrudéru, kde se zahřívá a taví, dokud nedosáhne vhodné teploty a viskozity. Roztavený polymer se poté přivádí do dávkovacího čerpadla, aby se zajistil jeho rovnoměrný tok do hlavy. Do té je přiváděn horký vzduch o vysoké rychlosti, který polymer „vystřelí“ z hlavy (trysky) a tím vytváří nanovlákná. Nanovlákná se shromažďují na pohyblivém sítu nebo bubnu, kde se vytváří samolepicí síť. Ta se poté navine a v případě potřeby se připraví na dokončení [7].



Obr. 4 Schéma technologie melt-blown [10]

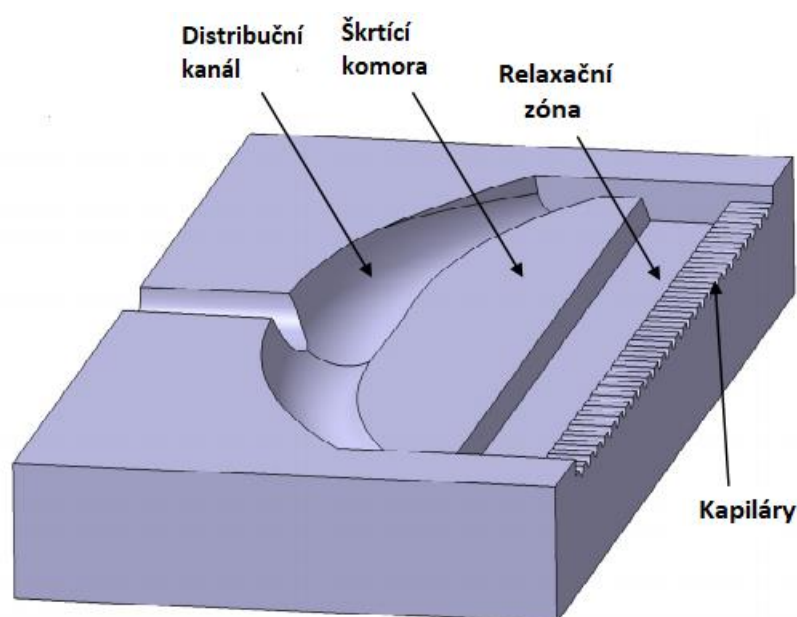
2.2.1.1. Dávkovací čerpadlo

V praxi se jako dávkovací čerpadlo v melt-blown technologiích používá zubové čerpadlo, které pomáhá udržovat požadovaný tlak v extrudéru. To zajišťuje, že roztavený polymer je dodáván rovnoměrně a konzistentně do hlavy při různých procesních proměnných, jakými jsou viskozita, tlak a teplota. Čerpadlo se skládá ze dvou kol, z nichž jedno se otáčí ve směru

hodinových ručiček a druhé proti směru hodinových ručiček. Polymer je nasáván z extrudéru, nesen zubem ozubeného kola a odváděn dále do systému [7].

2.2.1.2. Hlava

Jedná se o nejdůležitější prvek melt-blown systému a je odpovědný za výrobu kvalitních vláken. Skládá se ze tří komponentů: 1) distribučního kanálu; 2) zvlákňovací trysky; 3) vzduchových rozvodů. Tyto komponenty jsou na obrázku 5 doplněny o škrťací komoru a relaxační zónu. Všechny tyto části musí být pro výslednou kvalitu a rovnoměrnost sítě udržovány na požadovaných teplotách v závislosti na vybraném polymeru [7].



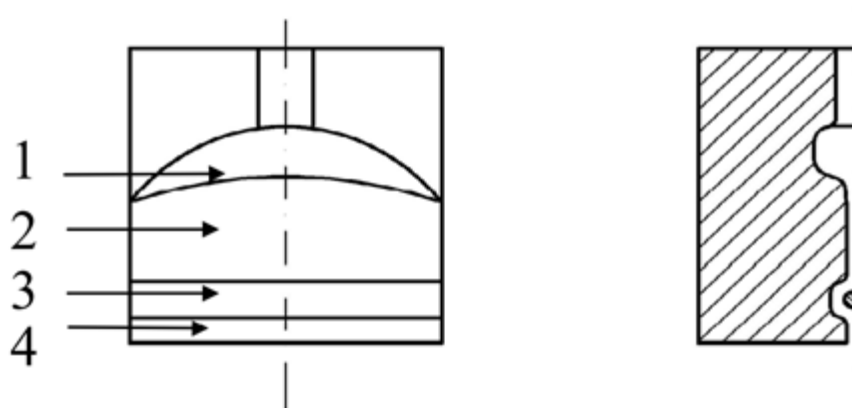
Obr. 5 Řez hlavy bez znázornění vzduchových rozvodů [11]

2.2.1.2.1. Distribuční kanál

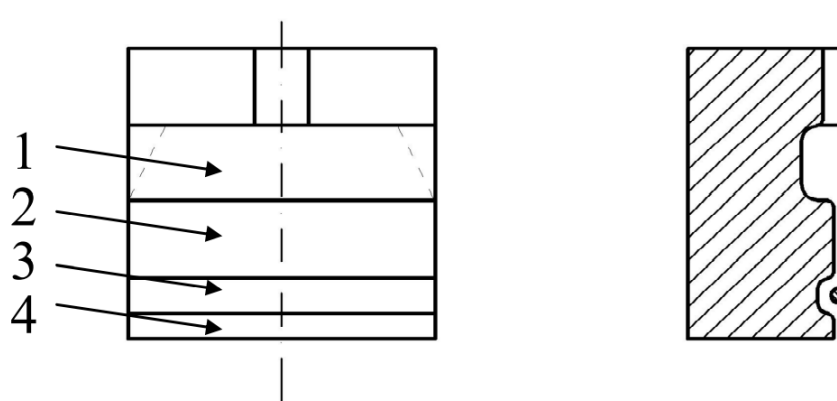
Distribuční kanál je součástí extrudéru zodpovědná za vytvoření rovnoměrného toku polymeru. U vstupu polymeru je buď 1) extrudér, který zajišťuje přetlak, nebo 2) čerpadlo, které tuto funkci nahrazuje. Díky geometrii kanálu polymer proudí a rovnoměrně se distribuuje, místo aby způsoboval hromadění taveniny uprostřed dopravního kanálu. Je důležité udržovat kanál zahřátý na konzistentní a správnou teplotu, aby polymer proudil a zabránilo se změnám jeho vlastností. Zásadní je také jeho tvar, který ovlivňuje distribuci polymeru [7].

Existuje několik typů distribučních kanálů, zaměřím se však na dva pro mou práci nejvíce relevantní: „ramínkového“ typu a typu „T“. Takzvané ramínko je nejběžněji používaný, a to pro svou funkci rovnoměrné distribuce toku polymeru. Svým tvarem připomíná parabolu.

Z kanálu se polymer přivádí přes škrťací komoru a relaxační zónu do zvláknovací trysky. Na obrázku 6 a obrázku 7 můžeme vidět znázorněné obě zmíněné varianty distribučních kanálů, přičemž v obou případech je: 1 = distribuční kanál, 2 = škrťací komora, 3 = relaxační zóna a 4 = kapilární (trysková) část [9].



Obr. 6 Kanál „ramínkového“ typu [11]



Obr. 7 Kanál „T“ typu [11]

2.2.1.2.2. Zvláknovací tryska

Zvláknovací tryska je klíčovou součástí hlavy a je do značné míry zodpovědná za průměr a kvalitu vláken a rovnoměrnost sítě. Konstrukce a výroba této součástky vyžaduje přesné měření. Trysku představuje široký, ale zploštělý blok kovu, který se zužuje do trojúhelníkového tvaru. V jeho hrotu může být vyvrtaných až několik tisíc otvorů zvaných kapiláry. Roztavený polymer vytlačovaný otvory zvláknovací trysky se později formuje na vlákna [7].

Profil těchto kapilár může být například kruhový, obdélníkový, ale i čtvercový. Za předpokladu kulatého profilu se otvory pohybují obvykle kolem 0,4 mm. Velikost otvoru se však může lišit,

doporučený rozstup je 1-4 otvory na milimetr. Poměr mezi délkou kapiláry a jejím průměrem se doporučuje minimálně 20/1. Nejběžněji se používá poměr až do 200/1 [9].

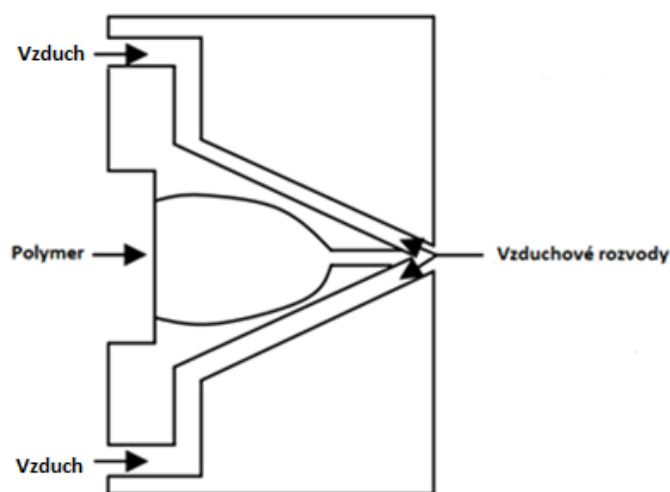
Taková konstrukce však způsobuje křehkost hrotu vzhledem k malému množství materiálu mezi jednotlivými děrami. To může vést k „zipování“, kdy se kov mezi otvory zlomí. V takovém případě musí být hlava vyměněna [7].

Existují dva základní typy hrotů trysky: kapilární a vrtané. Kapilární hrot je složen ze dvou částí, které jsou přesně vyrovnány, aby vytvořily otvory. Vrtaný typ představuje jeden kus kovu, do kterého jsou otvory vyvrtány [3].

2.2.1.2.3. Vzduchové rozvody

Vzduchové rozvody jsou odpovědné za přívod vzduchu o vysoké rychlosti. Ústí rozvodů je obvykle umístěno na stranách hrotu zvláknovací trysky a při výstupu naráží na polymer horkým vzduchem s vysokou rychlostí. Tím pomáhá při tažení nebo útlumu polymeru, čímž vznikají mikrovlákná [3]. Ke generování tohoto vysokorychlostního vzduchu, obvykle o 0,5–0,8 rychlosti zvuku, se používá Venturiho trubice a vzduchový kompresor [7].

Samotný vzduch musí být ohříván na stejnou teplotu jako tavenina, aby byl při nárazu zachován tekutý stav materiálu vyžadovaný k tvorbě sítě nanovláken. Tato teplota bývá obvykle 230 °C až 360 °C. Turbulence vzduchu (neboli nestabilitnost působící síly a směru nárazu vzduchu na taveninu) určuje úhel a čas letu nanovláken, čímž zajišťuje naprostou náhodnost výsledné sítě. V důsledku přenosu tepla a míchání s okolní atmosférou teplota vzduchu exponenciálně klesá mezi hlavou a kolektorem, což vede k tuhnutí vláken. Rychlosti ochlazení jsou obvykle v rozsahu $10^3 - 10^4 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ [9].



Obr. 8 Schéma vzduchových rozvodů [7]

2.2.1.3. Melt-blown nanovlákna

Vlákna vytvářejí velkou povrchovou plochu a disponují velmi malými póry, které dodávají látce dobré izolační a filtrační vlastnosti. Protože je výsledná síť tvořena různými průměry vláken, jako charakteristický rozměr se používá průměrná tloušťka vlákna. Ta je ovlivněna několika procesními proměnnými jako jsou teplota a viskozita taveniny či teplota a viskozita vzduchu. Mezi experty existují různé názory na to, jakou velikost průměrné tloušťky vláken je melt-blown technologie schopna vyrobit. Některé zdroje uvádí, že společně s ideálními podmínkami lze touto technologií dosáhnout průměru 0,1 mikronu, což je velikost považována za nanovlákno [12] [13]. Typickým rozsahem pro foukání taveniny bývají ale 2–4 mikrony [7]. Délka vlákna se běžně pohybuje od 12,7–28 cm. Váha takové sítě je uváděna v rozmezí 1–400 g/m² [14]. V praxi ale obvykle platí rozsah 20–200 g/m². Jednotvárnost a rovnoměrnost rozložení vláken je základní požadavek při výrobě, správná geometrie hlavy je proto jedním z nejdůležitějších faktorů [7].

2.2.1.4. Melt-blown technologie a procesní vady

Během výroby nanovláken může dojít k nechtěným jevům, které mají negativní vliv na finální produkt. V rámci své bakalářské práce představím několik základních vad, na které ve své publikaci upozornili M. Zatloukal a J. Drábek [9] a kterým se sám budu pokoušet vyvarovat. Vzhledem k tomu, že jsem nenašel český ekvivalent k pojmenování vad u anglické literatury, ponechávám jejich názvy v originále.

Whipping = ohýbání tenkých paprsků taveniny ve vzduchu. Zvyšování rychlosti vzduchu zužuje vlákna, ale zároveň způsobuje jejich vibraci, což je považováno za nechtěný efekt.

Die drool = akumulace polymeru na výstupu z trysky v obvykle nechtěně formované nebo dokonce ztuhlé hmotě, což omezuje tok. V nejhorším případě se může odtrhnout od trysky a způsobit zhoršení kvality výsledné sítě. Lze eliminovat optimalizací konstrukce hlavy.

Fiber breakup = zpřetrhání vláken, které je způsobeno rostoucím povrchovým napětím. Zúžení vláken způsobuje růst povrchového napětí, což vede k jeho následnému odtržení. Zvýšení viskozity polymeru nebo snížení rychlosti proudění vzduchu snižuje výskyt rozpadu vláken.

Melt spraying = zpřetrhání vláken (fiber breakup) ve větším měřítku, kdy dojde spíše k tvorbě kapiček taveniny než celistvého proudu.

Flies = tvorba velmi krátkých jemných vláken, která znečišťují okolní atmosféru, protože se nestanou součástí sítě. Bylo zjištěno, že velmi vysoké rychlosti vzduchu (blíží se až k nadzvukové) vytvářejí nestabilní pole proudění, které je odpovědné za velké množství nevázaných vláken. Odlétnutí volných částic je pravděpodobně způsobeno pouze ve dvou oblastech, kde je rozdíl mezi rychlostí vzduchu a vláken největší. Nachází se v blízkosti hrotu a v blízkosti kolektoru.

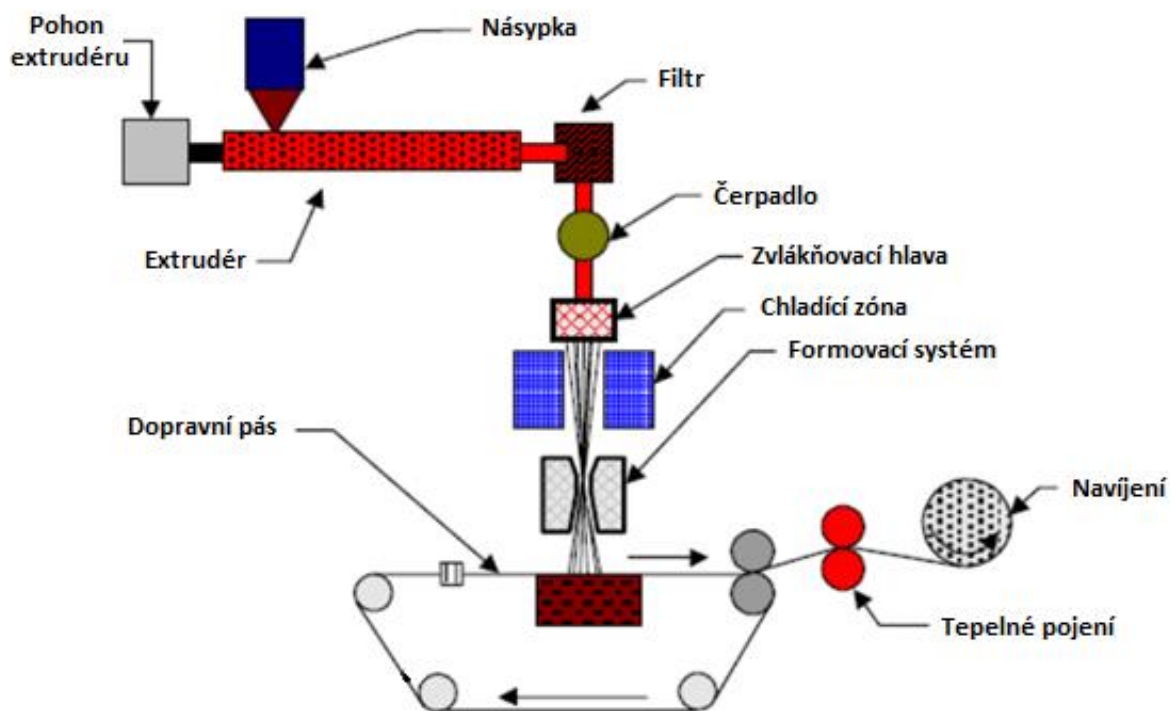
Shots = malé kulaté shluky polymeru v síti, které narušují její tvar. Za vnik „střel“ mohou především nečistoty u ústí trysky nebo také podmínky procesu, jako jsou vysoká teplota a příliš nízká molekulová hmotnost polymeru. Obecně jsou také spojovány s odtrháváním vláken.

Jam = shromáždění vláken v prostoru v důsledku adheze mezi vlákny. K té dochází během zpomalování rychlosti letu mezi hlavicí a kolektorem. Zpomalování přispívá k dezorientaci vláken a jejich zapletení. Bylo zjištěno, že snížení rychlosti vzduchu vede k většímu zamotávání kvůli delšímu času letu.

Nonuniform fiber diameters = nejednotný průměr vláken. Průměry vláken v MB výrobě lze popsat funkcí logaritmicky-normální distribuce bez ohledu na průměrnou tloušťku vlákna. Zvýšená viskozita taveniny zvyšuje průměrnou tloušťku vlákna, ale nemá vliv na rozsah získaných průměrů. Zatímco zvýšení elasticity taveniny nad prahovou hodnotu snižuje rozmanitost průměrů, ale zpravidla se průměrný průměr vlákna pohybuje ve vyšších číslech.

2.2.2. Spunbond technologie

Spunbond proces představuje jednu z dalších možností, jak vyrobit nanovlákná. Stejně jako u melt-blown technologie polymer projde tepelnou a homogenizační úpravou. Hlavní rozdíl mezi nimi nastává ve chvíli, kdy polymer opouští hlavu extrudéru. Na hlavu extrudéru totiž v případě spunbond procesu navazuje ještě zužující se trubice. Polymer je na začátku trubice proudem vzduchu ochlazen až do stavu tuhnutí a následně tlačěn skrze ústí trubice, kde je její průměr nejmenší. Kvůli tvaru trubice, který připomíná kužel, se uvnitř ní směrem k ústí zvyšuje rychlost vzduchu, který unáší polymer. Během letu polymeru v trubici vlákna zákonitě rotují. Podobný proces se používá při zvlákňování polymeru z roztoku [6].



Obr. 9 Schéma spunbond procesu [6]

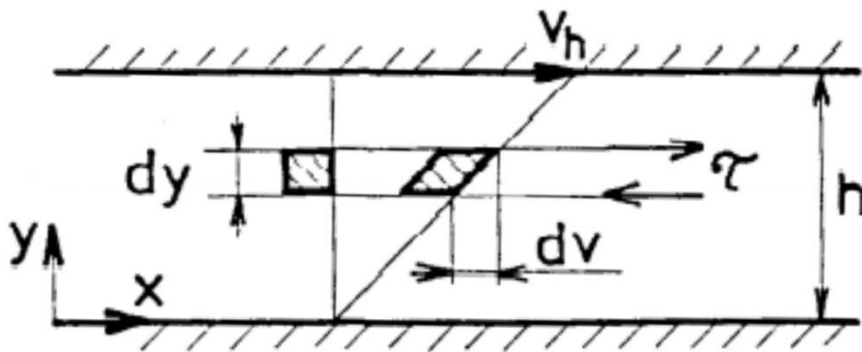
2.3. NENEWTONSKÉ KAPALINY

Všeobecně se o neneutonských kapalinách hovoří ve spojení s viskozitou, což je fyzikální vlastnost tekutiny, která udává závislost mezi tečným napětím a rychlostí smykové deformace. Zjednodušeně lze tvrdit, že s rostoucí viskozitou látky roste její odpor tečení.

Kapalinám, které mají tento poměr lineárně závislý, říkáme newtonské kapaliny [15]. Tečné napětí v takových kapalinách lze za předpokladu laminárního proudění spočítat podle vzorce:

$$\tau = \eta_n \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

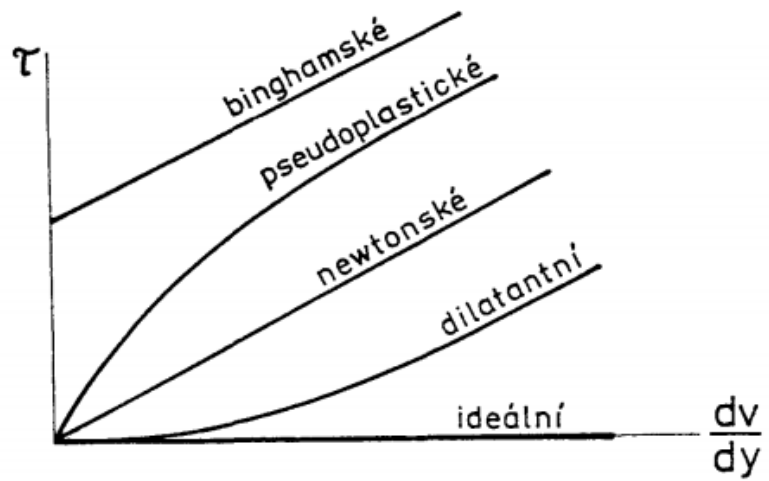
Kde τ je tečné napětí, η_n je dynamická viskozita (lineární), $\frac{dv}{dy}$ je rychlost smykové deformace.



Obr. 10 Znárodnění veličin Newtonova zákona [15]

Naopak kapaliny, u kterých je tato závislost nelineární, se označují neneutonské a viskozita takových kapalin se nazývá zdánlivá.

Neneutonské kapaliny se dělí na tři skupiny: časově nezávislé, časově závislé a viskoelastické kapaliny. U časově nezávislých kapalin má vliv na tečné napětí pouze rychlost smykové deformace, přičemž tato závislost není lineární. Naproti tomu u časově závislých kapalin, které se dělí na tixotropní nebo reopektní, záleží i na době vystavení vnější sil. Třetí skupinou jsou viskoelastické kapaliny. Jedná se o kapaliny, které svým chováním při zatížení připomínají jak ideální kapalinu, tak částečně i elastické těleso [16].



Obr. 11 Graf závislosti tečného napětí na rychlosti deformace u časově nezávislých kapalin [15]

2.4. VHODNÉ POLYMERY

Vzhledem k vysoké teplotě a celkové náročnosti procesu je volba správného polymeru stěžejní. Výběr je totiž nutné opřít o vlastnosti procesu.

Vysoká teplota, ke které dochází během extruze, nutí zúžit výběr na termoplasty. Většinou se v melt-blown technologii používá polypropylen (dále pouze jako PP).

Vlastnosti, kterými PP disponuje, zaručují kvalitní a odolnou síť. Mezi takové patří například:

- nízká hustota, která snižuje výslednou hmotnost sítě,
- nízká teplota tání a skelného přechodu,
- chemická stabilita,
- schopnost odpuzovat vodu (voděodolnost x hydrofobie),
- odolnost vůči plísním,
- odolnost vůči abrazi [9].

Viskozita se ovšem neopírá pouze o vlastnosti samotného materiálu, ale závisí i na procesních podmínkách, jako je teplota, tlak atd. Proto se u výběru materiálů často setkáváme s koeficientem MFR (Melt flow rate), respektive MFI (Melt flow index). Jedná se o koeficienty, který popisují tok polymeru [7]. Pro účely této práce budu dále používat koeficient MFR. Ten získám tak, že nechám extrudovat polymer za předem stanoveného tlaku a teploty a změříme hmotnost látky extrudované za 10 minut.

Vysoké MFR číslo většinou znamená nízkou zdánlivou viskozitu při měřených standardizovaných podmínkách. Tento koeficient ovšem nelze použít jako součást vývojových výpočtů, jelikož neudává poměr mezi tečným napětím a rychlostí smykové deformace, jejichž hodnoty se liší od těch normalizovaných pro měření MFR. Vzhledem ke standardizovaným podmínkám procesu zjišťování MFR neexistuje žádná spojitost mezi koeficientem a průtokem za jiných procesních podmínek [17].

Při výrobě polymeru se mohou přidávat aditiva v podobě minerálních prášků, skelných vláken apod. [4]. Například pro zlepšení filtračních schopností a stability výsledných vláken se přidává do PP nukleační činidlo stearátu hořečnatého (zrychlující krystalizaci), titaničitan barnatý nebo perlit [9].

2.5. REOLOGIE TAVENÝCH POLYMERŮ

Reologie se zabývá popsáním chování toku kapalin i za vlivu vnějších sil a s nimi spojených deformací. Obecně lze tavený polymer nazvat viskoelastickou kapalinou. Ovšem během melt-blown procesu se kvůli vysokým teplotám polymery chovají převážně jako viskózní kapaliny. Vliv elastické části je tedy i ve svém minimálním dosahu zanedbán [17].

Reologických teorií je mnoho. Některé se opírají spíše o statiku, jiné se snaží nelineárním závislostem tečného napětí a rychlosti smykové deformace přirčknout empirické vztahy. Ve společné práci R. P. Chhabra a J. F. Richardson představili několik nejzákladnějších teoretických modelů reologie tavených polymerů [16]. Jedná se o modely čistě viskózní neneutonské kapaliny, které se nejčastěji používají při návrhovém výpočtu hlavy a extrudérů.

2.5.1. Power-law model (mocninový)

Vztah mezi tečným napětím a rychlostí smykové deformace lze na malém rozsahu nahradit přímkou, která by měla rovnici:

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (2)$$

Viskozita se pak podle modelu power-law spočítá jako:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = K|\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (3)$$

Kde $\dot{\gamma}$ je rychlost smykové deformace, n je index toku neneutonské látky a konstanta K je koeficient konzistence. Látky s hodnotami $n < 1$ (pseudoplastické) mají schopnost rychlost smykové deformace zeslabit. K opačnému jevu dochází u látek dilatantních s $n > 1$. Kapalinu lze nazvat newtonskou, jestliže se její index toku rovná 1 [16]. Závislost koeficientu K na teplotě udává Arrheniova rovnice následovně [17]:

$$K = K_0 \exp \left[\frac{E}{R_p} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (4)$$

Kde E je aktivační energie, R_p je plynová konstanta, T je teplota a K_0 je koeficient konzistence při teplotě T_0 .

Vzhledem k jednoduchosti power-law modelu existují restriktce a námitky vůči jeho používání.

- Koeficienty n a K jsou také závislé na rychlosti smykové deformace, což způsobuje, že použití tohoto modelu, jak bylo řečeno, je pouze pro malé rozsahy $\dot{\gamma}$ a τ .
- Nepracuje s nulovou nebo naopak nekonečnou zdánlivou viskozitou, která se u polymerních materiálů často vyskytuje.
- Koeficient koexistence K je závislý na indexu toku n , což vyplývá z jeho jednotky $Pa \cdot s^n$, a proto není možné tento koeficient porovnávat s ostatními kapalinami, jestliže se jejich n liší [16].

Přes veškeré tyto nedostatky je power-law model stále nejpoužívanější a jsou pro něj odvozeny výpočtové návrhové vztahy pro jeho relativní jednoduchost v porovnání s ostatními modely.

Vzhledem k vlastnostem polymerů a rozsahu pracovních podmínek zpracovatelských strojů, v našem případě extruderů a jeho hlavy pro melt-blown technologii jsou v drtivé většině případů proudění taveniny laminární i při vysokých smykových rychlostech. Proto lze použít následující vztahy pro popis toku v jednoduchých geometriích. Pro trojrozměrný prostor lze rozepsat tenzor smykového napětí z rovnice (3) jako matice v kartézském souřadném systému [17]:

$$\dot{\gamma} = \begin{pmatrix} \dot{\gamma}_{xx} & \dot{\gamma}_{xy} & \dot{\gamma}_{xz} \\ \dot{\gamma}_{yx} & \dot{\gamma}_{yy} & \dot{\gamma}_{yz} \\ \dot{\gamma}_{zx} & \dot{\gamma}_{zy} & \dot{\gamma}_{zz} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Kde následně platí:

$$\dot{\gamma}_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \dot{\gamma}_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \dot{\gamma}_{zz} = \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\dot{\gamma}_{xy} = \dot{\gamma}_{yx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)$$

$$\dot{\gamma}_{yz} = \dot{\gamma}_{zy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)$$

$$\dot{\gamma}_{xz} = \dot{\gamma}_{zx} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)$$

Vložením do matice získáme rovnici:

$$|\dot{\gamma}|^2 = 2 \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^2 \quad (6)$$

Po dosazení do rovnice (3) dostaneme vzorce pro tečné napětí do různých směrů:

$$\begin{aligned} \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \eta \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \eta \left(\frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \eta \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

Určení parametrů K a n

Běžně se tyto parametry určují experimentálními metodami na přístrojích zvaných viskozimetry a reometry. Reometrie je obor reologie, který se zabývá právě měřením tokových vlastností látek. V případě rotačního reometru kužel-deska, nebo deska-deska, kde smyková rychlost závisí na kroutícím momentu aparátu, je vyjádřena v závislosti na vzdálenosti mezi deskami [17]. V rámci navrhování hlavy se nejvíce hodí reometrie kapilární, která označuje průtok jako funkci tlakové ztráty a smykovou rychlost závislou na průtoku. Základní rovnice pro kapilární reometrii jsou pak následující vztahy pro kruhovou kapiláru [17]:

$$\frac{\Delta p r_k}{2L_k} = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n * \left(\frac{4\dot{V}_k}{\pi r_k^3} \right)^n \quad (8)$$

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{4\dot{V}_k}{\pi r_k^3} \quad (9)$$

Kde Δp je tlaková ztráta, r_k je souřadnice poloměru kapiláry, L_k je délka kapiláry, \dot{V}_k je objemový průtok a $\dot{\gamma}_{app}$ je nekorigovaná smyková rychlost.

Hodnota parametrů K a n se stanoví z experimentálně získaných bodů měřené tlakové ztráty příslušného průtoku a jeho následnou transformací do reogramu představujícího závislost smykového napětí a smykové rychlosti. Rovnice křivky, kterou získám proložením bodů mocninovým modelem regresí, odhalí hledané parametry.

2.5.2. Carreaův model

K největším rozdílem mezi power-law a Carreau modelem dochází při velmi nízkých nebo naopak velmi vysokých smykových rychlostech, což je zřejmé právě kvůli přímkovému přístupu power-law modelu. Základní rovnice Carreaova modelu tedy vypadá:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \{1 + (\lambda\dot{\gamma})^2\}^{\frac{n-1}{2}} \quad (10)$$

Přičemž n a λ jsou parametry materiálu a relaxačního času. Rovnice se rozšiřuje také o hodnoty viskozity při potenciálně nulové η_0 , respektive nekonečné η_{∞} hodnotě rychlosti smykového deformace, což znamená, že na úkor počtu parametrů dostávám model s mnohem širším rozsahem působnosti v porovnání s power-law. O newtonskou kapalinu se jedná v případě, kdy je splněna alespoň jedna podmínka v podobě $n=1$ nebo $\lambda=0$ [16].

2.5.3. Crossův viskózní model

Stejně jako u Carreaova modelu se Crossův model opírá o čtyři parametry v rovnici:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{1 + k(\dot{\gamma})^n} \quad (11)$$

Zatímco parametry n a k popisují tokovou křivku, tak parametry spojené s viskozitou v limitních případech zůstávají stejné jako v Carreaově modelu. Jakmile se parametr $k \rightarrow 0$, mluvíme o kapalině newtonské. Podobně tomu tak je také v případě, kdy $\eta \gg \eta_{\infty}$ nebo $\eta \ll \eta_0$. Původně autor rovnice Cross zamýšlel nahradit parametr n za $2/3$, který by v praxi stačil na pokrytí většiny případů. V dnešní době se od této myšlenky ustupuje a hodnota parametru n se spojuje s konkrétními materiály [16].

2.5.4. Elissův model

Předchozí modely byly založeny na závislosti tečného napětí na rychlosti smykové deformace. To v praxi znamenalo, že v jakémkoliv momentu bylo možné spočítat hodnotu tečného napětí pouze na základě rychlosti smykové deformace. Ellis tuto závislost obrátil a vytvořil rovnici:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{1/2}}\right)^{\alpha_s - 1}} \quad (12)$$

Kde η_0 je viskozita při nulové rychlosti smykové deformace, α_s je stupeň schopnosti zeslabit rychlost smykové deformace a koeficient $\tau_{1/2}$ je velikost tečného napětí, při kterém zdánlivá viskozita nabývá půlku hodnoty η_0 . V případech, kdy se rychlost smykové deformace pohybuje v nízkých hodnotách, kde power-law model není kvůli velkým odchylkám použitelný, se nejvíce hodí využití Ellisova modelu [16].

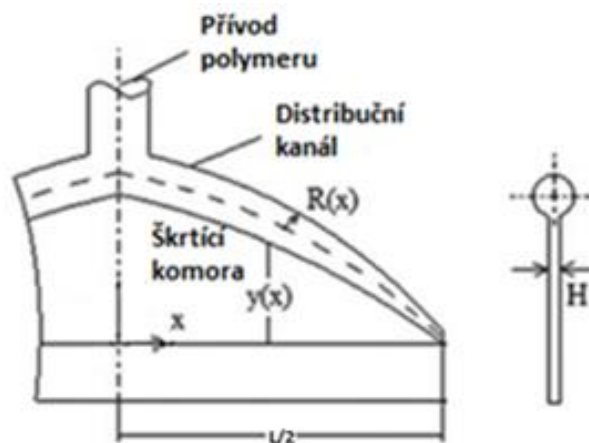
2.6. GEOMETRIE DISTRIBUČNÍHO KANÁLU

Vzhledem k funkci distribučního kanálu je jeho geometrie naprosto stěžejní. Platí zde pravidlo, že komplexnější geometrie by zpravidla měla znamenat rovnoměrnější rozprostření rychlosti toku polymeru. Důkazem tomu může být kanál typu T, ve kterém vznikají takzvané „mrtvé zóny“, které zhoršují jeho účinnost [18]. Pro svou práci jsem zvolil komplexnější a složitější přístup ke geometrii v podobě ramínkového kanálu, pro který platí rovnice:

$$y(x) = y_0 \left(\frac{\frac{L}{2} - x}{\frac{L}{2}} \right)^n \quad (13)$$

$$R(x) = R_0 \left(\frac{\frac{L}{2} - x}{\frac{L}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

kde y_0 je hodnota y pro $x = 0$, n je index toku nenewtonské kapaliny modelu power-law, R je poloměr distribučního kanálu a R_0 je poloměr distribučního kanálu pro $x = 0$ [19].



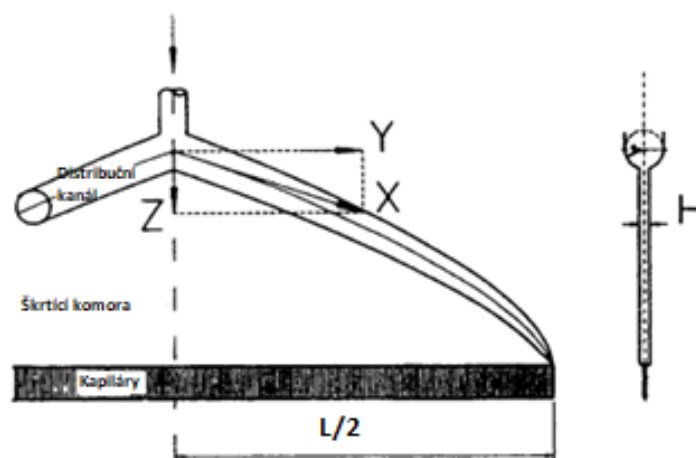
Obr. 12 Popis geometrie ramínkového kanálu [19]

2.7. PRŮTOK

Protože se v praktické části odkazují na reologický power-law model, je pro mne průtok společně s tlakovou ztrátou jedním z nejdůležitějších parametrů. Horním limitem je pro procesní výpočty průtok extrudéru při maximálním výkonu.

2.7.1. Distribuční kanál a škrťací komora

Výpočet průtoku hlavou před vstupem do kapilár lze rozdělit na dvě části: průtok distribučním kanálem a průtok škrťací komorou [17]. Určení souřadnicového systému je znázorněno na obrázku 13.



Obr. 13 Zvolený souřadnicový systém ramínkového kanálu a škrťací komory [17]

Aby bylo možné určit průtok jednotlivými částmi, musím předpokládat následující chování:

1. průtok se nemění s časem,
2. maximální rychlost kapaliny je v ose přívodního kanálu a rychlost kapaliny na vnitřním obvodu je nulová (kapalina neklouže) – tlakové proudění,
3. hmotnost a setrvačná síla jsou zanedbány,
4. kapalina je viskózní a nestlačitelná,
5. ve vtokové trubici kapalina teče pouze ve směru Z a v distribučním kanálu pouze ve směru X,
6. proudění je laminární a izotermické,
7. tekutý polymer se chová podle power-law modelu [17].

Za těchto podmínek definujeme průtok kanálem [17]:

$$\dot{V}_1 = \left(\frac{\pi n}{3n+1} \right) * \left(\frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} * \frac{r^{\left(\frac{3n+1}{n} \right)}}{\left[1 + \left(\frac{dY}{dZ} \right)^2 \right]} * \left(\frac{dp}{dZ} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (15)$$

A průtok škrťací komorou [17]:

$$\dot{V}_2 = \left(\frac{n}{2(2n+1)} \right) * \left(\frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} * H^{\left(\frac{2n+1}{n} \right)} * \left(\frac{dp}{dZ} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (16)$$

Kde p je tlak a H se rovná šířce škrťací komory podle obrázku (13).

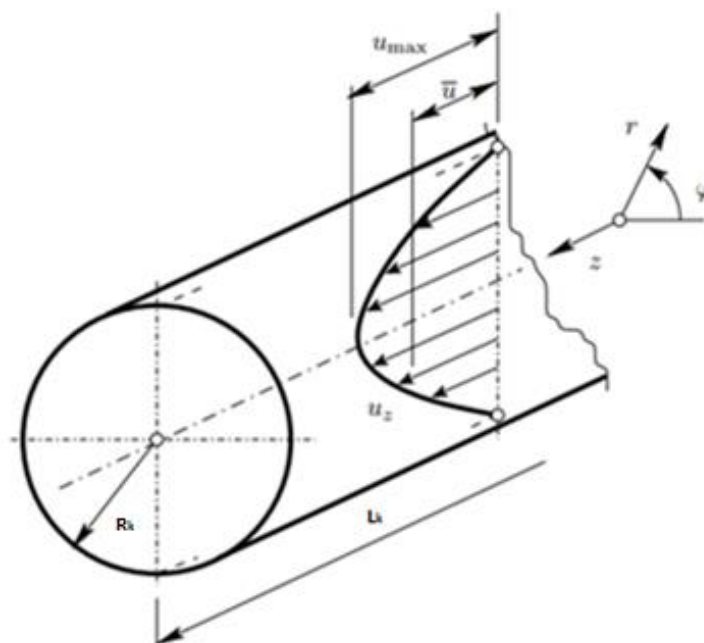
Podle rovnice kontinuity můžeme napsat [17]:

$$\dot{V}_2 = - \frac{d\dot{V}_1}{dY} = \sum_{i=1}^N \dot{V}_{k_i} \quad (17)$$

Kde \dot{V}_k znázorňuje průtok kapilárou přibližný v následující kapitole.

2.7.2. Kapilára

Vzhledem ke tvaru kapilár jsem nucen počítat v cylindrických souřadnicích. Zvolení souřadného systému je znázorněno na obrázku 14.



Obr. 14 Schéma cylindrických souřadnic v trubce [20]

Průtok kapilárou lze klasifikovat jako tlakové proudění s tlakovou ztrátou a lze jej rozdělit na 3 fáze podle souřadnice Z. Při vstupu polymeru do úzkého průměru kapiláry nastává mísení tokových čar, což způsobuje i jeho prvotní natahování. Vše je doplněno změnou rychlostního profilu, který dosáhne úplného tlakového proudění na minimálních vzdálenostech od vstupu. Druhou fází je úplné tlakové proudění přes většinu délky kapiláry. Poslední oblast je výstupní, kde polymer opouští kapiláru. Visko-elastická tavenina se nejvíce projevuje právě při výstupu z kapiláry, i přesto je její význam zanedbatelný [17].

V takto zvoleném souřadném systému je třeba určit podmínky tlakového proudění. Trubka se v ideálním případě nehýbe, velikost rychlosti kapaliny ve směru Z u obvodu kapiláry je proto nulová.

$$u_z(r=R) = 0 \quad (18)$$

Druhá podmínka říká, že na ose kapiláry není žádné tečné zrychlení:

$$\frac{\partial u_z}{\partial r}(r=0) = 0 \quad (19)$$

Vrátím-li se k obrázku 14 a na ose vytvořím tečnu mocninné funkce rychlostního profilu, tak bude rovnoběžná se souřadnicí r.

Pro tečné napětí tedy bude platit rovnice [20]:

$$0 = -\frac{\Delta p}{L_k} + \frac{1}{r_k} \frac{\partial(r_k \tau_{rz})}{\partial r_k} \quad (20)$$

Která po úpravách může vypadat i takto [20] [16]:

$$\tau_{rz} = \frac{\Delta p * R_k}{2L_k} = K \left| \frac{\partial u_z}{\partial r} \right|^{n-1} \left| \frac{\partial u_z}{\partial r} \right| = K \dot{\gamma}^n = \eta * \dot{\gamma} \quad (21)$$

Vzorců pro výpočet tečného napětí je mnoho, čehož později využiji v praktické části.

Objemový průtok by se bez znalosti přístroje počítal následovně [20]:

$$\dot{V}_k = -\pi R_k^2 \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\Delta p}{2KL_k} \right)^{\frac{1}{n}} R_k^{\frac{n+1}{n}} \quad (22)$$

Kde R_k je poloměr kapiláry.

V případě této práce ovšem znám výkon přístroje, jelikož je jedním ze zadaných vstupních parametrů. Podle rovnice kontinuity by se proto objemový průtok kapiláry měl rovnat [17]:

$$\dot{V}_c = \frac{\dot{V}_k}{N_k} \quad (23)$$

Kde \dot{V}_c se rovná objemovému průtoku extrudéru a N_k určuje počet kapilár.

Nekorigovaná smyková rychlost na stěně kapiláry se počítá [16]:

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{4\dot{V}_k}{\pi R_k^3} \quad (24)$$

Abych ovšem dostal reálnou smykovou rychlost, musím smykovou rychlost korigovat. Rabinowitschova korekce spočívá v přidání závislosti smykové rychlosti na indexu toku [16].

$$\dot{\gamma} = \frac{4\dot{V}_k}{\pi R_k^3} \left(\frac{3n+1}{4n} \right) \quad (25)$$

Výtoková rychlost v závislosti na souřadnici r se počítá [20]:

$$u_z = \frac{n}{n+1} \left(\frac{\Delta p}{2KL_k} \right)^{\frac{1}{n}} R_k^{\frac{n+1}{n}} \left[\left(\frac{r_k}{R_k} \right)^{\frac{n+1}{n}} - 1 \right] \quad (26)$$

Střední objemová rychlost [20]:

$$\bar{u} = \frac{\dot{V}_k}{\pi R_k^2} = -\frac{n}{3n+1} \left(\frac{\Delta p}{2KL_k} \right)^{\frac{1}{n}} R_k^{\frac{n+1}{n}} \quad (27)$$

Bezrozměrná rychlost vztažená na střední objemovou rychlost, neboli pro konstantní objemový průtok, lze spočítat následovně [20]:

$$u_z^* = \frac{u_z}{\bar{u}} = \frac{3n+1}{n+1} \left[\left(1 - \frac{r_k}{R_k} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \quad (28)$$

2.8. TLAKOVÉ ZTRÁTY

Stejně jako průtok, i tlaková ztráta lze počítat s odkazem na power-law model. Maximální hodnota tlakové ztráty extrudéru může být, stejně jako průtok, horním limitem procesních výpočtů.

2.8.1. Distribuční kanál a škrťící komora

Tuto tlakovou ztrátu počítám ve směru Z podle obrázku 13. Tlaková ztráta z rovnice (29) je počítána jako tlaková ztráta škrťící komory rozšířené o poloměr distribučního kanálu, který je reprezentován v koeficientu Z_0 . Takto zapsaná rovnice zastupuje tlakovou ztrátu v obou částech hlavy [17].

$$\Delta p_s = \left(\left(\frac{\pi n}{3n + 1} \right) \left(\frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \right)^{-1} * H^{\left(\frac{2n+1}{n} \right)} * Z_0 * \dot{V}_c \quad (29)$$

Kde H značí šířku škrťícího kanálu a Z_0 reprezentuje vzdálenost osy distribučního kanálu od kapiláry pro $x = 0$ podle obrázku 13.

2.8.2. Kapilára

Každá část průtoku kapilárou (viz kapitola 2.7.2.) má svou vlastní tlakovou ztrátu:

- tlaková ztráta na vstupu kapiláry (místní) Δp_{ent} – je největší a je považována za hnací tlak,
- tlaková ztráta způsobená viskozitou (třecí) Δp_c ,
- tlaková ztráta při výstupu z kapiláry (místní) Δp_{exit} [17].

Celková tlaková ztráta je součtem všech dílčích tlakových ztrát.

$$\Delta p_k = \Delta p_{ent} + \Delta p_c + \Delta p_{exit} \quad (30)$$

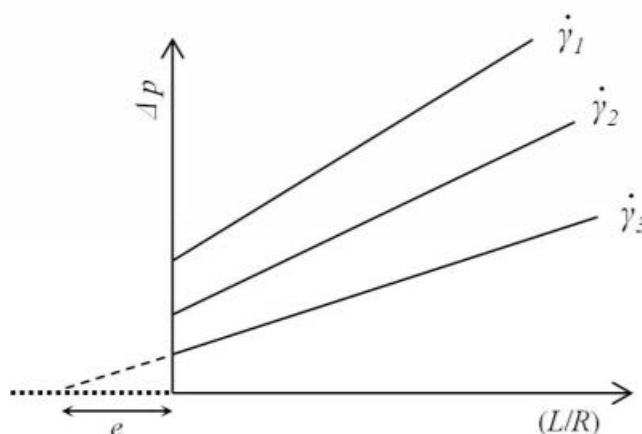
Tlaková ztráta Δp_c lze spočítat jako:

$$\Delta p_c = (A\dot{V}_k)^n * L_k \quad (31)$$

Kde koeficient A je definován:

$$A = \left[\frac{\pi n}{3n + 1} \left(\frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} R_k^{\frac{3n+1}{n}} \right]^{-1} \quad (32)$$

Tlaková ztráta na vstupu do kapiláry Δp_{ent} může být počítána pomocí Bagleyho korekce. Tato metoda využívá fiktivní délku kapiláry eR , kterou přičítá ke skutečné délce kapiláry L_k [17]. Fiktivní vzdálenost je přidána tak, aby celková tlaková ztráta na délce L_k byla srovnatelná s tlakovou ztrátou čistě tlakového proudění na vzdálenosti $L_k + eR_k$ za stejného průtoku [21]. Běžně se pro $\frac{L_k}{D_k} = 4 - 40$ používá $e = 6$ [17].



Obr. 15 Grafické znázornění Bagleyho korekce [21]

Při výstupu z kapiláry se polymer chová převážně visko-elasticky. Tlaková ztráta se v této oblasti tedy rovná energii zbylé pružné deformace. V rámci MB ale platí vztah: $\Delta p_{exit} \ll \Delta p_{ent}, \Delta p_c$, a tudíž se tento efekt zanedbává [17].

Tlakovou ztrátu v kapiláře lze vyjádřit:

$$\Delta p_k = \Delta p_{ent} + \Delta p_c = (A\dot{V}_k)^n * (L_k + eR_k) \quad (33)$$

Celková tlaková ztráta procesu se počítá jako součet tlakových ztrát distribučního kanálu, škrťací komory i kapiláry.

$$\Delta p_{celkové} = \Delta p_{\xi} + \Delta p_k \quad (34)$$

3. PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci praktické části své práce se budu zabývat návrhem vytlačovací hlavy pro výrobu nanovláken pomocí melt-blown technologie. Nejdříve představím extrudér, pro který hlavu navrhnu a přiblížím vlastnosti zadaného materiálu. Součástí zadání je objemový průtok extrudéru pro zadaný materiál, který se rovná $6,5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$.

Navrhnou vnitřní geometrii tokové soustavy, pro kterou spočítám celkovou tlakovou ztrátu. Tím ověřím její funkčnost. Součástí návrhu jsou i topné patrony, pro které spočítám potřebný příkon, který doplním výpočty tepelných ztrát hlavy. Navrhnou šroubové spojení a ověřím, jestli spoj během procesu vydrží. Vyberu materiál, ze kterého se hlava bude vyrábět a na závěr popíšu, jak se hlava smontuje dohromady.

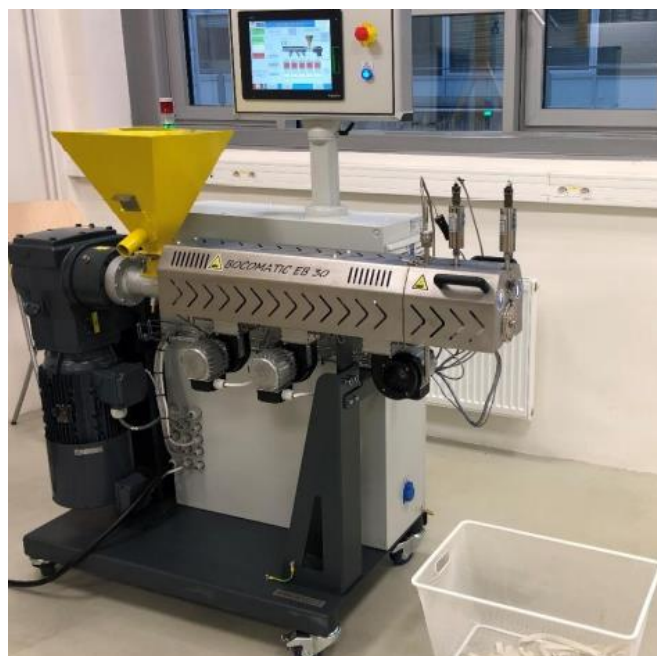
Výsledkem praktické části by měl být kompletní návrh funkční hlavy pro vyfukování nanovláken opřený o procesní výpočty a graficky znázorněný jak v sestavovém výkresu, tak ve 3D v prostředí aplikace Autodesk Inventor. V rámci své práce nebudu moci vyzkoušet hlavu v praxi, jelikož výroba takové hlavy značně přesahuje kritéria mé bakalářské práce. Hlavu jsem navrhoval pro podmínky školní laboratoře.

3.1. EXTRUDÉR

Pro školní účely je k dispozici extrudér od české firmy BOCO. Jmenovitě se jedná o přístroj BOCO EB-L 30 určený pro zpracování termoplastů. Mezi výbavu tohoto extrudéru patří teplotní i tlakové snímače. Základní parametry přístroje jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Parametry extrudéru BOCO EB-L 30

Parametr	Hodnota	Jednotka
Průměr šneku	30	mm
Poměr délky/průměr šneku	27	1
Výkon extrudéru	2-10	kg/h
Celkový výkon	9	kW
Maximální tlaková ztráta	300	Bar



Obr. 16 Extrudér BOCO EB-L 30

3.2. MATERIÁL

Při výběru materiálu je nutné nahlížet na MFR, respektive MFI (viz kapitola 2.4.). V melt-blown technologii se standardně využívají materiály s vyššími hodnotami koeficientu MFR, respektive MFI, jelikož takové materiály kladou menší odpor vůči tečení a dosahují kvalitnějších výsledků. Proto byl pro můj návrh zadán materiál Polypropylen borflow HL512 s koeficientem MFR (230 °C/2,16kg) = 1200 g/min a teplotou tání 158 °C, který splňuje podmínku vysokého koeficientu [22].

3.3. NÁVRH HLAVY

Cílem procesních výpočtů hlavy bude stanovit její vnitřní geometrii, tlakové ztráty, tepelné ztráty, pevnostní výpočty, výrobní materiál a postup montáže. Celková tlaková ztráta je parametr extrudéru, který není možné překročit. Vzhledem k nestabilitě určitých procesů doprovázených například náhodným prudkým vzrůstem tlakové ztráty jsem se rozhodl cíleně vyvarovat limitním hodnotám přístroje. Jako svou horní hranici pro tlakovou ztrátu procesu jsem proto zvolil 100 barů. Správný návrh vnitřní geometrie a celkovou funkčnost tedy budu počítat v rámci tlakových ztrát. Objemový průtok pro používaný polymer byl také zadán a je roven $6,5\text{cm}^3\text{s}^{-1}$.

3.3.1. Zvlákňovací tryska – kapiláry

Na základě podkladů z teoretické části [9] jsem zvolil kruhový profil kapiláry, u kterého se průměr pohybuje v desetinách milimetrů. Příhodně jsem tedy zvolil první konstantu výpočtu v podobě poloměru kruhové kapiláry:

$$R_k = 0,25 \text{ mm} \quad (35)$$

Délku kapiláry L_1 jsem vypočítal z doporučených hodnot. Poměr mezi délkou a průměrem kapiláry jsem zvolil 40 [9]. Po vyjádření délky z rovnice jsem se dostal k hodnotě:

$$L_k = 40 * 0,5 = 20 \text{ mm} \quad (36)$$

Podmínkou pro určení šířky celé zvlákňovací trysky, která je potřeba k dalším výpočtům, je nutné stanovit mezery mezi kapilárami a celkový počet kapilár. Mezera mezi kapilárami L_m je doporučena v rozměru 1 mm a celkový počet kapilár N_k je zvolen na 50 dle doporučení odborné literatury [9].

Následně lze dopočítat šířku zvlákňovací trysky podle rovnice:

$$L = 2 * R_k * N_k + L_m * (N_k - 1) = 2 * 0,25 * 50 + 1 * (50 - 1) = 74 \text{ mm} \quad (37)$$

V tabulce 2 jsou přehledně uvedeny všechny důležité parametry.

Tabulka 2 Parametry pro výpočet geometrie kapiláry

Parametr	Hodnota	Jednotka
Poloměr kapiláry R_k	0,25	mm
Délka kapiláry L_k	20	mm
Mezera mezi kapiláry L_m	0,1	mm
Počet kapilár N_k	50	1
Šířka trysky L	74	mm

3.3.2. Distribuční kanál

Při pohledu na rovnice (13) a (14) je nutné nejprve určit parametry kanálu v místě $x = 0$. Zvolil jsem $y_0 = 20\text{mm}$ a $R_0 = 4,8\text{mm}$ vzhledem k šířce hlavy a průměru dopravního kanálu ze specifikovaného extrudéru. Index toku taveniny, který dosazuji do rovnice (13), mám spočítaný v kapitole 3.3.3. Je nutné zvolit dostatečný počet bodů na ose x , od kterých budu zbytek geometrie odvíjet. Vzhledem k dobré kvalitě funkce „šablonování“ v Inventoru jsem zvolil body 4, například:

$$y(x = 10\text{ mm}) = 20 \left(\frac{37 - 10}{37} \right)^{0,69} = 16,1\text{ mm} \quad (38)$$

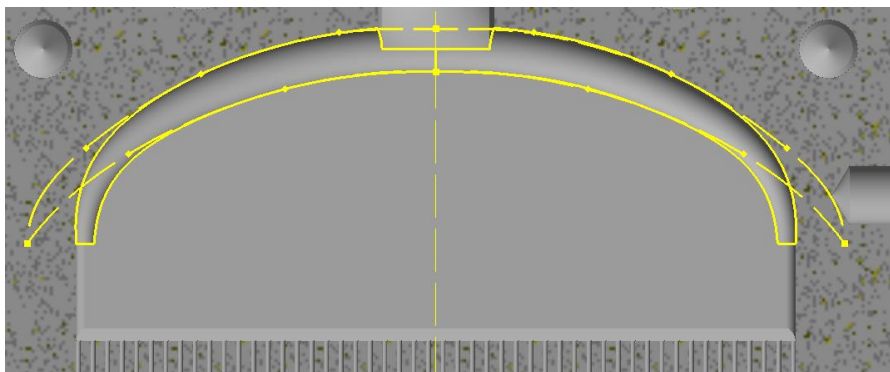
$$R(x = 10\text{ mm}) = 0,48 \left(\frac{37 - 10}{37} \right)^{\frac{1}{3}} = 4,1\text{ mm} \quad (39)$$

Ovšem za předpokladu, že do rovnic (13) a (14) dosadím za x půlku délky L , dostanu nulový poloměr kanálu, a tedy úplné zaškrčení kraje trysky.

$$y\left(x = \frac{L}{2}\right) = y_0 \left(\frac{\frac{L}{2} - \frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} \right)^n = 0 \quad (40)$$

$$R\left(x = \frac{L}{2}\right) = R_0 \left(\frac{\frac{L}{2} - \frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} = 0 \quad (41)$$

Tento problém jsem vyřešil umělým prodloužením celé trysky o 10 mm. Šířku poloviny trysky jsem tedy z původních 37 mm prodloužil na 42 mm. Vymodeloval jsem rozšířený kanál a v potřebné vzdálenosti jsem delší model „ořízl“ a zarovnal.



Obr. 17 Schéma modelování distribučního kanálu

3.3.3. Tlakové ztráty

Tlaková ztráta kapiláry je považována za hnací tlakovou ztrátu [17], a lze proto předpokládat, že tlaková ztráta distribučního kanálu a škrťací komory bude menší. Proto jsem se rozhodl ji počítat nejdříve. V rámci výpočtů, které jsou vztaženy k reologickému modelu power-law, je nejprve nutné určit rychlost smykové deformace. Z rovnic (24) a (25) je patrné, že smyková rychlost je závislá na objemovém průtoku kapiláry. Ten je nutné vypočítat z celkového objemového průtoku, který byl pro zvolený materiál dopředu stanoven:

$$\dot{V}_c = 6,5 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (42)$$

Výpočet objemového průtoku pro jednu kapiláru a jeho převedení na základní jednotky podle rovnice (23) vypadá:

$$\dot{V}_k = \frac{6,5}{50} = 0,13 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} = 0,13 * 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (43)$$

Po dosazení získaných hodnot do rovnice (24) nám vyjde nekorigovaná smyková rychlost:

$$\dot{\gamma}_{app} = \frac{4 * 0,13 * 10^{-6}}{\pi * (0,25 * 10^{-3})^3} = 10\,593,35 \text{ s}^{-1} \quad (44)$$

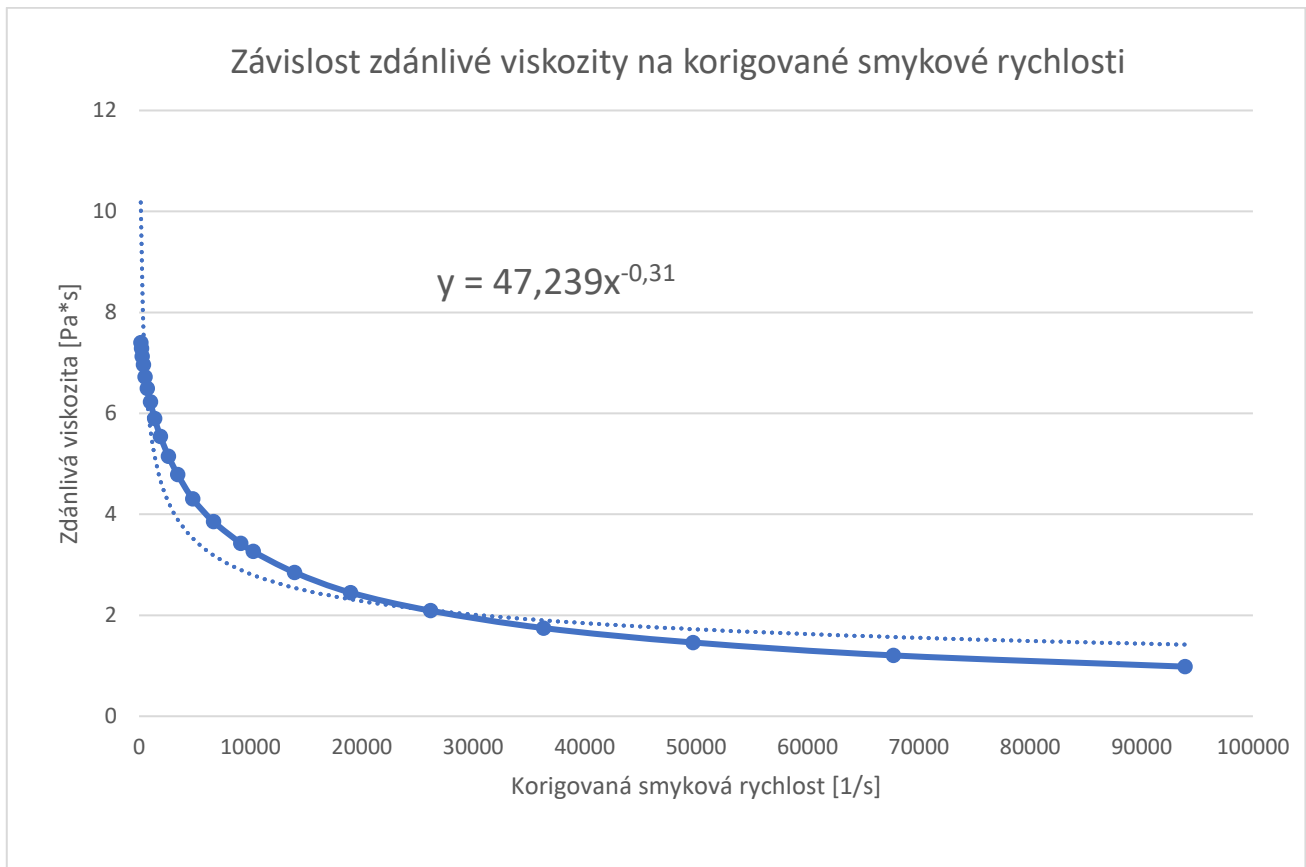
Abychom mohli pokračovat v počítání, je nutné určit index toku taveniny n . Na základě teoretických podkladů [22] jsem jeho hodnotu určil:

$$n = 0,69 \quad (45)$$

Tímto mám veškeré potřebné parametry pro provedení Rabinowitschovy korekce, která se řídí podle rovnice (25):

$$\dot{\gamma} = \frac{4 * 0,13 * 10^{-6}}{\pi * (0,25 * 10^{-3})^3} \left(\frac{3 * 0,69 + 1}{4 * 0,69} \right) = 11\,783,19 \text{ s}^{-1} \quad (46)$$

Z odborné literatury [22] jsem také převzal graf na obrázku 18, na kterém je vyobrazena závislost zdánlivé viskozity na korigované smykové rychlosti pro zvolený materiál.



Obr. 18 Závislost viskozity na korigované smykové rychlosti [22]

Graf jsem proložil mocninou regresní funkcí a její rovnici jsem porovnal s rovnicí power-law modelu (3). Tím jsem zjistil hodnotu koeficientu konzistence K .

$$K = 47,239 \text{ Pa} * \text{s}^n \quad (47)$$

Z obrázku 18 jsem následně odečetl hodnotu zdánlivé viskozity pro vypočítanou hodnotu korigovaného napětí:

$$\eta = 3,09 \text{ Pa} * \text{s} \quad (48)$$

Stanovením zdánlivé viskozity jsem dospěl do fáze, kdy mám určenou i korigovanou smykovou rychlost a mohu dopočítat tečné napětí podle rovnice (21):

$$\tau_{rz} = \eta * \dot{\gamma} = 3,09 * 11\,783,19 = 36\,410,05 \text{ Pa} \quad (49)$$

Ze stejné rovnice (21) si mohu vyjádřit tlakovou ztrátu v podobě:

$$\Delta p_{k1} = \frac{2L_k * \tau_{rz}}{R_k} = \frac{2 * 0,002 * 36\,410,05}{0,00025} = 5\,825\,607 \text{ Pa} = 58,26 \text{ barů} \quad (50)$$

Zjištěním koeficientu K jsem získal možnost spočítat tlakovou ztrátu kapiláry i pomocí rovnic z kapitoly 2.8.2. Dosazením do rovnice (32) jsem se dostal k hodnotě koeficientu A:

$$A = \left[\frac{\pi * 0,69}{3 * 0,69 + 1} \left(\frac{1}{2 * 47,239} \right)^{\frac{1}{0,69}} (0,25 * 10^{-3})^{\frac{3*0,69+1}{0,69}} \right]^{-1} = 1,098 * 10^{19} \quad (51)$$

Jelikož se jedná pouze o koeficient průběžného výpočtu, nechal jsem výsledek bez jednotky. Tento koeficient jsem posléze dosadil do rovnice (33) a získal tlakovou ztrátu kapiláry pomocí reologických koeficientů a Bagleyho korekce:

$$\begin{aligned} \Delta p_{k2} &= (1,098 * 10^{19} * 0,13 * 10^{-6})^{0,69} * (0,002 + 6 * 0,25 * 10^{-3}) \\ &= 52,36 \text{ barů} \end{aligned} \quad (52)$$

Nyní zbývá pouze dopočítat tlakovou ztrátu distribučního kanálu a škrťací komory z rovnice (29):

$$\begin{aligned} \Delta p_s &= \left(\left(\frac{\pi * 0,69}{3 * 0,69 + 1} \right) \left(\frac{1}{2 * 47,239} \right)^{\frac{1}{0,69}} \right)^{-1} * 0,002^{\left(\frac{-2*0,69+1}{0,69} \right)} * 0,02 * 6,5 \\ &* 10^{-6} = 2,74 \text{ barů} \end{aligned} \quad (53)$$

Protože se jedná o limitní hodnoty přístroje, které nesmím překročit, použiji vyšší hodnotu spočítané tlakové ztráty z rovnice (50). Celková tlaková ztráta se rovná součtu jednotlivých tlakových ztrát podle rovnice (34):

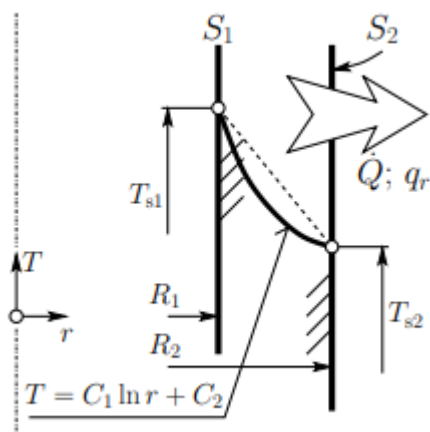
$$\Delta p_{\text{celkové}} = 2,74 + 58,26 = 60,99 \text{ barů} \quad (54)$$

Výsledná celková tlaková ztráta je menší, než zvolený limit 100 barů a lze proto předpokládat, že hlava bude funkční.

3.3.4. Tepelné ztráty

Protože potřebuji udržet polymer na specifických teplotách, musí být hlava externě ohřívána. Pro správné navržení ohřívacích patron musím spočítat její tepelné ztráty. Hlavu nahradím válcovou trubkou, kde teplota vnitřní stěny bude odpovídat teplotě taveniny a na vnější stěně odhadnu teplotu okolí a konvektivní součinitel přestupu tepla. Vzhledem k tomu, že znám celkový objem taveniny v hlavě (který je roven objemu kanálu, který dostanu z 3D modelu) a znám celkovou délku hlavy, mohu prostorově složitý kanál nahradit válcovým kanálem. Průměr vnitřního kanálu vypočtu z výše uvedených veličin. Následně celkové tepelné ztráty spočítám z rovnice pro kombinovaný přestup tepla stěnou:

$$d_p = \sqrt{\frac{4 * V_p}{\pi * L_h}} = \sqrt{\frac{4 * 9,66 * 10^{-6}}{\pi * 0,1}} = 0,011 \text{ m} \quad (55)$$



Obr. 19 Schéma vedení tepla válcovou stěnou [20]

Pro přehlednost výpočtů jsou důležité parametry uvedeny v tabulce 3. Teplotní vodivost a součinitel přestupu tepla byly odborně zvoleny.

Tabulka 3 Důležité parametry výpočtů tepelných ztrát hlavy

Parametr	Značka	Hodnota	Jednotka
Průměr dutiny	d_p	0,011	m
Průměr hlavy	d_h	0,1	m
Délka hlavy	L_h	0,01	m
Teplotní vodivost	λ_T	15	W/mK
Teplota okolí	T_0	293,15	K
Součinitel přestupu tepla na povrchu hlavy (odhad)	α	5	W/m^2K

Tepelné ztráty při zanedbání přestupu tepla čelem hlavy jsou:

$$Q = k_h * S (T_{in} - T_0) \quad (56)$$

Kde k_h je celkový součinitel přestupu tepla a S je teplosměnná plocha vztažená k vnějšímu průměru hlavy.

$$S = \frac{\pi * d_h^2}{4} * L_h \quad (57)$$

Teplota taveniny T_{in} je stanovena:

$$T_{in} = 320 \text{ } ^\circ\text{C} = 593,15 \text{ K} \quad (58)$$

Potom k_h spočítáme jako:

$$k_h = \frac{k_{1m}}{\pi d_h} \quad (59)$$

Kde k_{1m} je součinitel přestupu tepla vztažený na 1 m délky hlavy.

$$k_{1m} = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha d_p} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_h}{d_p}} = \frac{\pi}{\frac{1}{0,011 * 5} + \frac{1}{2 * 15} \ln \frac{0,1}{0,011}} = 0,174 \text{ } W/m^2K \quad (60)$$

Dosazením zpět do rovnice (59) dostaneme:

$$k_h = \frac{0,174}{\pi * 0,1} = 0,552 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (61)$$

Tepelné ztráty z rovnice (56) se rovnají:

$$Q = k * S (T_{in} - T_o) = 0,552 * \frac{\pi * 0,1^2}{4} * (593,15 - 293,15) = 1,3 \text{ W} \quad (62)$$

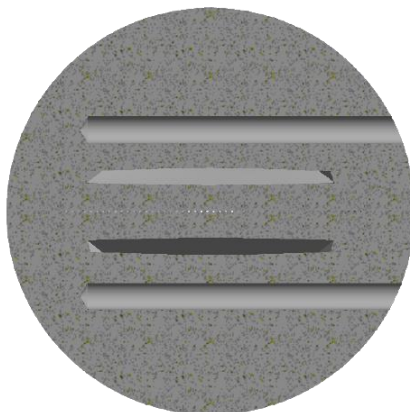
Abych mohl spočítat teplo potřebné k ohřátí celé hlavy, zvolil jsem měrnou tepelnou kapacitu podle doporučení v technické specifikaci materiálu $450 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}}$. Hmotnost hlavy byla stanovena na základě 3D modelu v Inventoru na 5,52kg. Celkové teplo potřebné k ohřátí hlavy tedy spočítáme:

$$Q = c * m * (T_{in} - T_o) = 450 * 5,52 * (593,15 - 293,15) = 745 200 \text{ J} \quad (63)$$

Časový požadavek na zahřátí hlavy do provozní teploty byl stanoven na 25 minut. Požadovaný příkon tepelných patron tedy spočítám podle rovnice:

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{745 200}{1500} = 496,8 \text{ W} \quad (64)$$

Z katalogu firmy Backer Elektro CZ jsem vybral vyhovující patrony s příkonem 300 W, průměrem 6,5 mm a délkou 6 cm. V mém návrhu ovšem není dostatek místa, abych ohřívací patronu umístil podél toku taveniny. Díry pro patrony jsem tedy byl nucen udělat kolmo k toku taveniny blízko kapilár.

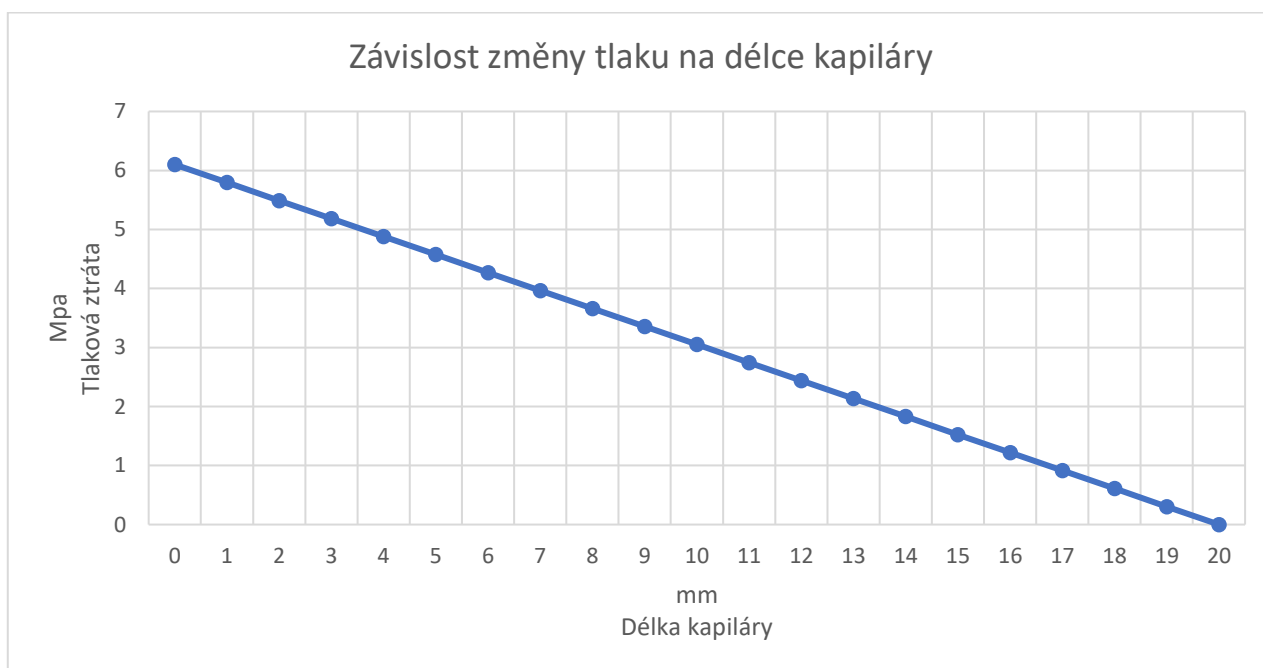


Obr. 20 Znárodnění děr pro tepelné patrony

3.3.5. Pevností výpočty

Připojení hlavy k extrudéru je zprostředkováno třmenem s přírubou, pro který jsem na hlavě vymodeloval přírubový profil. Ten bude sám o sobě držet hlavu pohromadě určitou silou, která ovšem zaručeně nebude dostatečná. Hlava totiž bude namáhána ve dvou směrech. Jedním z těchto směrů bude snaha hlavy odpojit se od extrudéru. Tuto sílu by měl plně vykompenzovat zmiňovaný třmen, který je navržen výrobcem extrudéru na maximální pracovní tlak. Druhý směr namáhání bude snaha rozdělit hlavu na dvě půlky v místě spoje. Aby tato situace nenastala, je nutné součásti spojit dohromady šroubovým spojením.

Za předpokladu, že tlaková změna v kapiláře bude po celé její délce lineární, bude její tlakový profil vypadat tak, jak je znázorněn v grafu 4. Hodnotu tlakové ztráty jsem pro jednoduchost výpočtu zaokrouhlil na 6,1 MPa.



Obr. 21 Závislost změny tlaku na délce kapiláry

Stejně jako v běžné praxi využijí pro pevnostní výpočty střední hodnotu tlakové ztráty.

V tabulce 4 jsou pro lepší orientaci shromážděny důležité parametry pro zvolené šrouby a kapiláry.

Tabulka 4 Důležité parametry pevnostních výpočtů

Šroub M10 8.8	Značka	Hodnota	Jednotka
Mez kluzu (0-150 °C)	σ_k	640	MPa
Průměr dřívku	d_d	0,008	m
Počet šroubů	N_ξ	2	1
Poloměr kapiláry	R_k	0,00025	m
Střední hodnota tlakové ztráty	p_s	3,05	MPa

Za předpokladu, že řešíme pouze sílu snažící se rozdělit hlavu na dvě části, vzniká ve šroubovém spojení čistě tahová síla. V rámci bezpečnosti počítám v celé kapitole raději s průměrem dřívku šroubu. Velikost takové síly se pro všechny šrouby rovná:

$$F_c = p_s * \frac{\pi * d_d^2}{4} = 3\,050\,000 * \frac{\pi * 0,008^2}{4} = 153,31 \text{ N} \quad (65)$$

Šrouby jsou umístěny souměrně od osy, a tudíž na všechny šrouby by mělo působit stejné napětí. K hodnotě napětí jednoho šroubu se dostanu podle rovnice:

$$F = \frac{F_c}{N_\xi} = \frac{153,31}{2} = 76,65 \text{ N} \quad (66)$$

Tahovou sílu ve šroubech mohu pak lehce přepočítat na tahové napětí:

$$\sigma = \frac{F}{S_d} = \frac{F}{\frac{\pi * d_d^3}{4}} = \frac{76,65}{\frac{\pi * 0,008^3}{4}} = 190\,625\,000 \text{ Pa} = 190,63 \text{ MPa} \quad (67)$$

Všeobecně se proces extruze v pevnostních výpočtech klasifikuje jako mívivé zatížení. Při mívivém zatížení se standardně hodnoty kritického napětí sníží o 40 %, čímž se dostanu na napětí dovolené.

$$\sigma_D = \sigma_k * 0,6 = 384 \text{ MPa} \quad (68)$$

Bezpečnost šroubového spojení následně spočítám takto:

$$k = \frac{\sigma_D}{\sigma} = \frac{384}{190,63} = 2,01 \quad (69)$$

Během navrhování hlavy jsem dbal především na její velikost. Při snaze uspořít co nejvíce materiálu jsem se rozhodl použít šrouby M10 pevností třídy 8.8, jelikož pro dostatečné hodnoty bezpečnosti stačí pouze 2 šrouby. Na více než jeden pár šroubů by mi v modelu nevystačilo místo. Vysokým koeficientem bezpečnosti se snažím zabránit i nejmenšímu možnému pohybu hlavy v oblasti kapilár, který by měl špatný vliv na výsledná nanovlákná. Zároveň jsem podle vyhlášky ISO 898–1 zvolil kritické napětí v rozsahu pouze 0-150 °C. Vyšším koeficientem bezpečnosti se také snažím kompenzovat fakt, že procesní teplota foukání tavenin se pohybuje v rozsahu 200-400 °C. Ukázka šroubového spojení je v kapitole 3.3.7.

3.3.6. Výrobní materiál hlavy

Pro svou práci jsem vybral legovanou ocel s českým označením ČSN 19 554, potažmo německým označením DIN 1.2344.

„Jedná se o chrom-molybden vanad-křemíkovou ocel ke kalení v oleji a na vzduchu s velmi dobrou prokalitelností, vysokou pevností za tepla a odolností proti popuštění i otěru, velmi dobrou houževnatostí a plastickými vlastnostmi při normálních i zvýšených teplotách. Dále ocel vykazuje velmi dobrou odolnost proti vzniku trhlinek tepelné únavy. Ocel je vhodná pro tepelné zpracování i na pevnosti přes 1765 N/mm², a na nástroje chlazené vodou. Je dobře tvárná za tepla a dobře obrobitelná ve stavu žíhaném naměkko“ [23].

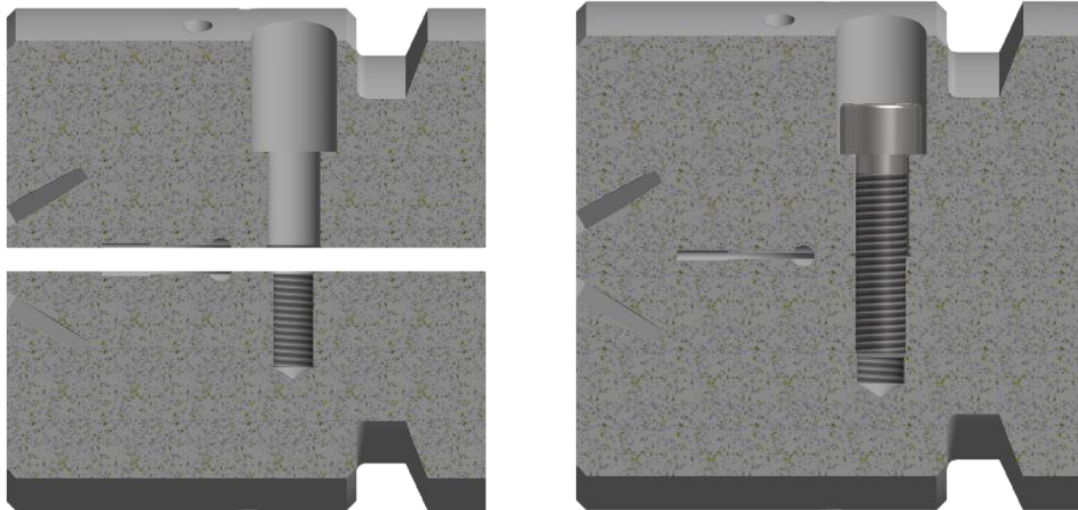
Teplotní odolnost je hlavním důvodem výběru této konkrétní oceli.

Tabulka 5 Chemické složení nástrojové oceli ČSN 19 554 [23]

Značka oceli	Chemické složení [%]					
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
ČSN 19554	0,34-0,44	0,2-0,5	0,8-1,2	4,8-5,8	1,1-1,6	0,8-1,2

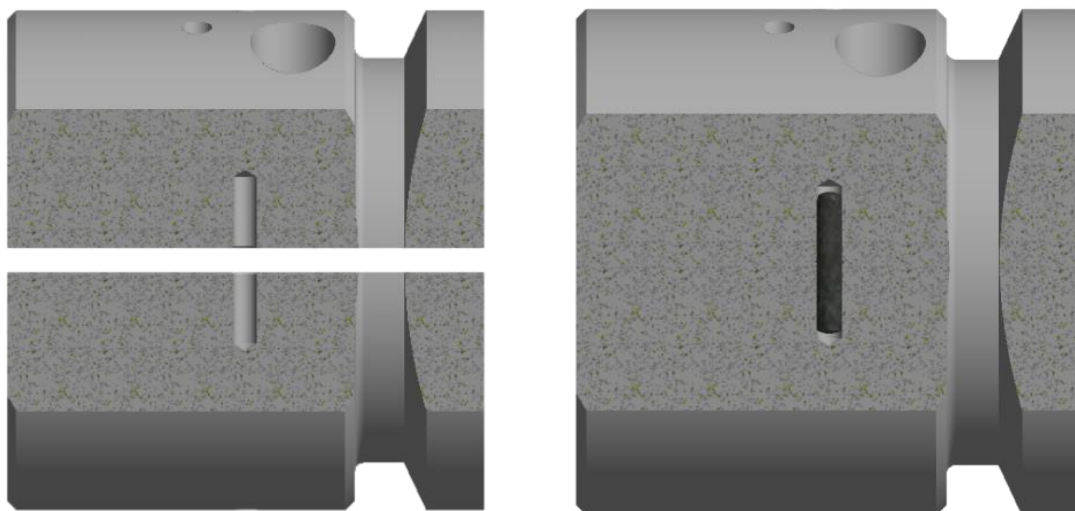
3.3.7. Montáž hlavy

Hlava se skládá ze dvou částí, převážně kvůli čištění tokových kanálů. Tyto dvě poloviny u sebe drží dva šrouby. Jedna její polovina má zapuštěnou díru, o kterou se opře hlava šroubu. Druhá má vyříznutý závit, do které se šrouby zašroubují. Názorná ukázka díry pro šroub je na obrázku 22.



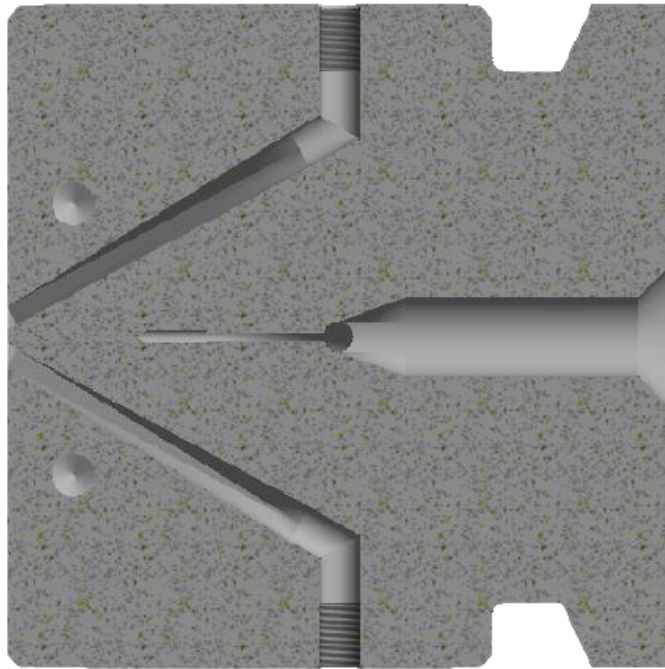
Obr. 22 Šroubové spojení

Jelikož dělicí rovina tělesa prochází skrz kapiláry, které mají v průměru polovinu milimetru, musel jsem zařídit správné dosednutí částí hlavy s přesností na setiny milimetru. Za tímto účelem jsem navrhl dvě díry pro kolíky.



Obr. 23 Zajištění hlavy pomocí kolíku

Vzduchové nože jsou připevněny k hlavě pomocí závitu M6, do kterého se zašroubují vývody z kompresoru a jsou znázorněny na obrázku 24.



Obr. 24 Znárodnění připojení vzduchových nožů.

Vzhledem k vysokým teplotám procesu není možné přidat mezi hlavu a extrudér gumové těsnění. Z tohoto důvodu by se styčné plochy měly před spojením utěsnit měděnou pastou.

4. ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval procesem výroby nanovláken pomocí melt-blown technologie. Pro tu je typické, že kombinuje proces vytlačování a vyfukování taveniny polymeru.

V teoretické části jsem se zprvu věnoval nastínění fungování extrudéru a popisem melt-blown technologie. Popsal jsem jednotlivé části speciální hlavy. Přiblížil jsem proces navrhování vnitřní geometrie vybraného distribučního kanálu a objasnil jsem důležitost velikosti kapilár. Vytvořil jsem přehled výpočtů (dostupných ze současné odborné literatury), jakými jsou například tlakové ztráty nebo výtokové rychlosti, které jsou nutné pro správné fungování melt-blown technologie. Popsal jsem procesní vady technologie, kterým jsem se v praktické části pokusil vyvarovat. Následně jsem se věnoval charakterizaci neneutonských kapalin, mezi které spadá i tavenina polymeru, jelikož tokové vlastnosti značně ovlivňují proces výroby. Přiblížil jsem různé reologické modely a jejich využití. Stěžejní pro mě byl power-law model, který jsem následně využil v druhé polovině práce.

Praktická část se věnovala samotnému návrhu speciální hlavy. Mou snahou bylo vytvořit a prezentovat takový návrh, který bude poskytovat veškeré potřebné informace pro realizaci hlavy. V úvodu praktické části jsem představil konkrétní extrudér a přiblížil jsem vlastnosti konkrétního polymeru, pro které je navrhovaná hlava určena. Vlastnosti polymeru jsem získal z odborné literatury a pro své výpočty použil v korigovaném tvaru. Prvně jsem navrhl geometrii distribučního kanálu a kapilár, na kterých jsem postavil procesní výpočty tlakových a tepelných ztrát. Hlavu jsem prověřil i v rámci pevnostních výpočtů a navrhl postup její montáže. Součástí bakalářské práce je také sestavový výkres.

Výsledný návrh je sice pouze teoretický, ale je podložen procesními výpočty, které by měly zaručovat funkčnost hlavy a zároveň splňují výkonnostní podmínky pro zmíněný extrudér. Z tohoto důvodu věřím, že funkčnost hlavy by se potvrdila i v případě její výroby.

5. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

α	součinitel přestupu tepla	W/m^2K
α_s	stupeň schopnosti zeslabit smykovou rychlost	[1]
c	měrná tepelná kapacita	J/kgK
d_h	průměr hlavy	m
d_p	průměr nahrazené dutiny	m
d_d	průměr dřívku	m
e	koeficient Bagleyho korekce	[1]
E	aktivační energie	J
F_c	celková síla na šrouby	n
F	síla na jeden šroub	n
H	šířka škrťící komory	m
K	koeficient konzistence	$Pa * s^n$
k_h	celkový součinitel přestupu tepla	W/m^2K
k_{1m}	součinitel přestupu tepla na 1 m	W/m^2K
k	bezpečnost	[1]
L	šířka trysky	m
L_m	velikost mezery mezi kapilárami	m
L_k	délka kapiláry	m
L_h	délka hlavy	m
m	hmotnost	kg
n	index toku	[1]
N_s	počet šroubů	[1]
N_k	počet kapilár	[1]
η	zdánlivá viskozita	$Pa * s$
η_n	dynamická viskozita	$Pa * s$
η_∞	viskozita při nekonečné smykové rychlosti	$Pa * s$
η_0	viskozita při nulové smykové rychlosti	$Pa * s$
P	příkon	W
p	tlak	Pa
p_s	střední hodnota talkové ztráty	Pa
Q	teplo	J
R	poloměr distribučního kanálu	M
R_p	plynová konstanta	$J/molK$
R_k	poloměr kapiláry	m

Seznam použitých symbolů

S	teplosměnná plocha hlavy	m^2
S_d	plocha dříku	m^2
T	teplota	K
t	čas	s
T_0	teplota okolí	K
T_{in}	teplota taveniny	K
τ	tečné napětí	Pa
u_z	výtoková rychlost	m/s
\bar{u}	střední objemová rychlost	m/s
u_z^*	bezrozměrná rychlost	[1]
v	rychlost	m/s
\dot{V}_1	objemový průtok distribučním potrubím	m^3/s
\dot{V}_2	objemový průtok škrťící komorou	m^3/s
\dot{V}_k	objemový průtok kapilárou	m^3/s
\dot{V}_c	celkový objemový průtok	m^3/s
V_p	objem vnitřních tokových kanálu hlavy	m^3
$\dot{\gamma}$	korigovaná smyková rychlost	s^{-1}
$\dot{\gamma}_{app}$	nekorigovaná smyková rychlost	s^{-1}
Δp	tlaková ztráta	Pa
Δp_s	tlaková ztráta škrťící komory a distribučního kanálu	Pa
Δp_k	tlaková ztráta kapiláry	Pa
Δp_{ent}	tlaková ztráta na vstupu do kapiláry	Pa
Δp_c	tlaková ztráta způsobená viskozitou	Pa
Δp_{exit}	tlaková ztráta při výstupu z kapiláry	Pa
$\Delta p_{celkové}$	celková tlaková ztráta	Pa
π	Ludolfovo číslo	[1]
λ	parametr relaxačního času	[1]
λ_T	teplotní vodivost	W/mK
σ_d	dovolené napětí	Pa
σ_k	mez kluzu	Pa
σ	napětí	Pa

6. POUŽITÁ LITERATURA

1. **Seidl, Martin.** *Stroje pro zpracování polymerních materiálů.* Svitavy : Code Creator, 2016. ISBN: 978-80-88058-71-7.
2. **Katedra strojírenské technologie, Technická univerzita Liberec.** *Technolige II. Technická univerzita liberec.* [Online] Technická univerzita Liberec. [Citace: 27. 7 2021.] http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/06.htm?fbclid=IwAR0UW4s9LZ3BeePcaReYbxIIAgdlbIHGrlcX-h_COp6BS1hkdAQthHSQ9w#061.
3. **Hutten, Irwin M.** *Handbook of nonwoven filter media.* Boston : Elsevier, 2016. ISBN 978-0-08-098301-1.
4. **Ausperger, Aleš.** *Technologie zpracování plastů.* místo neznámé : Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-77-9.
5. **Chaturvedi, Ekta, a další.** Experimental Study and Mathematical Modeling for Extrusion using High Density Polyethylene. *Materials Today: Proceedings.* 2017, Sv. 4, 2, stránky 1670-1676.
6. **Hosun, Lim.** A Review of Spun Bond Process. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management.* 2010, Sv. 6, 3.
7. **Duton, Kathryn C.** Overview and Analysis of the Meltblown Process and Parameters. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management.* 2008, Sv. 6, 1.
8. **Chvojka, Adam.** Návrh opatření pro zajištění možnosti vytlačování svařovacích drátů z polyamidu na univerzálním vytlačovacím stroji. *Diplomová práce.* [online]. Liberec : Technická univerzita v Liberci, fakulta strojním, katedra strojírenské technologie, 2008. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/8613/mgr_15716.pdf?sequence=1.
9. **Zatloukal, Martin a Drábek, Jiří.** Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review. *Physics of Fluids.* 2019, Sv. 31, 9.
10. **Farag, Ahmad.** *Meltblown Technology: Module: Polymer-Extrusion based Technologies.* [online] místo neznámé : Ahmad Farag Nonwovens Excellence, 2019. Dostupné z: <https://www.ahmadfarag.com/expertise/meltblown-technology>.
11. **Macosko, Christopher W.** *Rheology: Principles, Measurements, and Applications.* New York : John Wiley and Sons, 1994. ISBN 0-417-18575-2.
12. **Shambaugh, Robert L.** A macroscopic view of the melt-blowing process for producing microfibers. *Industrial and Engineering Chemistry Research.* 1988, Sv. 27, 12, stránky 2363-2372.
13. **Vargas, E.** *Meltblown technology Today: an overview of raw materials, processes, products, markets, and emerging end uses.* San Francisco : Miller Freeman, 1989. ISBN 9780879301767.
14. *A review of the melt blown process.* **Gahan, R. a Zguris, G. C.** Long Beach : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000. Conference on Applications and Advances, The Fifth Annual. Sv. 2000. ISBN 0-7803-5924-0.
15. **Ježek, Jan, Váradiová, Blanka a Adamec, Josef.** *Mechanika tekutin (skripta).* Praha : ČVUT, 2000.

16. **Chhabra, R. P. a Richardson, J. F.** *Non-newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering applications*. Oxford : Butterworth Heinemann, 2008. ISBN 07-5068532-8.
17. **Sun, Qin a Zhang, Dong.** Analysis and Simulation of Non-Newtonian Flow in the Coat-Hanger Die of a Meltblown Process. *Journal of Applied Polymer Science*. 1998, Sv. 67, 2, stránky 193-200.
18. *A novel method for efficient engineering design of sheet dies by means of fluid dynamics.* **Celik, A. a Bonten, C.** místo neznámé : AIP Publishing, 2020. Volume 2289: Proceedings of PPS2019 Europe-Africa Regional Conference of the Polymer Processing Society. Sv. 2289. ISBN 9780735440197.
19. **Meng, Kai a Wang, Xinhou.** Numerical simulation and analysis of fluid flow in double melt-blown die. *Textile Research Journal*. 2013, Sv. 83, 3, stránky 249-255.
20. **Dostál, Martin, a další.** *PHTH: Pomocník*. [online] Praha : ČVUT, 2020. Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/~dostama1/phth/phth-aidezmoi.pdf>.
21. *Měření tokových vlastností.* [online] Zlín : Ústav fyziky a materiálového inženýrství, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
22. **Drábek, Jiří.** *Applied rheology for melt blown technology.* [online] Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011.
23. **W. NR. 1.2344. JKZ.** [Online] JKZ Bučovice. [Citace: 1. 8 2021.] <https://www.jkz.cz/cs/produkty/nastrojove-oceli/na-vyrobu-forem/w-nr-12344/>.

7. SEZNAM PŘÍLOH

Číslo	Název	Počet stran	Formát
P1	Sestavový výkres hlavy	2	A3