

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



# PŘENOS TEPLA MEZI ŠNEKEM A KAPALINOU

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2022

Jakub Lojek

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Lojek** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457564**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**  
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**  
Specializace: **Procesní inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Přenos tepla mezi šnekem a kapalinou**

Název diplomové práce anglicky:

**Heat transfer between screw and liquid**

Pokyny pro vypracování:

Proveďte literární rešerši k problematice přenosu tepla mezi šnekem a vazkou homogenní kapalinou se zaměřením na přenos tepla a disipaci mechanické energie vlivem vazkých napětí v kapalině. Zaměřte se na okrajovou podmínku druhého druhu na povrchu šneku, tj. podmínku konstantní hustoty tepelného toku, proudění velmi vazké newtonské, případně neneutronské kapaliny popsané power-law modelem. Zaměřte se na výsledky získané analytickým řešením, experimenty a numerickou simulací pomocí systémů CFD. Pokuste se do literární rešerše zahrnout vhodné jednodušší geometrie - například přestup tepla mezi rotujícím diskem, mezikružím, v kapalině, či brodicím se kapalinou. Sestavte numerický model umožňující stanovení hydrodynamických a tepelných poměrů na vyhříváném šneku rotujícím v homogenní kapalině (při zadané geometrii, volná hladina, bezosý šnek, plnění) pomocí vybraného CFD řešiče. Proveďte numerické simulace pro vybrané procesní parametry (otáčky šneku, vlastnosti kapaliny, plnění) s cílem získání informací o součiniteli přestupu tepla na povrchu šneku a příkonu potřebného na otáčení šneku. Během numerických simulací se zaměřte na taveniny polyethylenu a polypropylenu.

Seznam doporučené literatury:

Dle provedené literární rešerše.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Martin Dostál, Ph.D. ústav procesní a zpracovatelské techniky FS**

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

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **18.09.2022**

Ing. Martin Dostál, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

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

## Poděkování

---

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Dostálovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a trpělivost během mého snažení se o sepsání tohoto díla. Poděkování patří i mé rodině a mým blízkým, kteří mi po celou dobu studia byli velkou oporou.

# Anotační list

---

<b>Jméno autora:</b>	Jakub
<b>Příjmení autora:</b>	Lojek
<b>Název práce česky:</b>	Přenos tepla mezi šnekem a kapalinou
<b>Název práce anglicky:</b>	Heat transfer between screw and liquid
<b>Rozsah práce:</b>	počet stran: 95 počet obrázků: 54 počet rovnic: 45 počet tabulek: 11 počet příloh: 2
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Jazyk práce:</b>	český
<b>Ústav:</b>	12118 Procesní a zpracovatelské techniky
<b>Studijní program:</b>	Procesní inženýrství
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. Martin Dostál, Ph.D.

**Klíčová slova:** Šnekový dopravník, přestup tepla, konstantní hustota tepelného toku, CFD simulace.

**Keywords:** Screw conveyor, heat transfer, constant heat flux density, CFD simulation.

**Anotace česky:** Diplomová práce je rozdělena na úvod, rešeršní a praktickou část. V úvodu se zmiňuji o aplikaci šnekového zařízení. Popisuji zde šnekový dopravník, šnekový extrudér a šnekový pyrolýzní reaktor. V rešeršní části se věnuji přestupu tepla ze stěny do kapaliny zejména při podmínce konstantní hustoty tepelného toku na stěně. V praktické části představuji nastavení, výpočet a výsledky simulací toku viskózní taveniny ohříváním šnekovým dopravníkem.

**Anotace anglicky:** The diploma thesis is divided into introduction, research and practical part. In the introduction, I write about the application of the Screw device. There I describe screw conveyor, screw extruder and screw pyrolysis reactor. In the research part, I focus on heat transfer from wall to liquid especially with constant heat flux density boundary condition on the wall. In the practical part, I present setting, calculation and results of simulations of viscous melt flow through a heated screw conveyor.

# Obsah

---

1.	Úvod .....	8
1.1.	Šnekový dopravník.....	9
1.2.	Vytlačování plastů.....	12
1.3.	Pyrolýza .....	16
2.	Literární rešerše .....	20
2.1.	Rozdělení kapalin.....	20
2.2.	Přenos tepla.....	22
2.3.	Přestup tepla mezi paralelními deskami .....	24
2.4.	Přestup tepla v mezikruží .....	26
2.5.	Ohřev šneku Jouleovým teplem .....	32
2.6.	Tavení materiálu.....	36
2.7.	Doprava materiálu.....	39
2.8.	Materiálová data .....	42
2.9.	Software ANSYS Fluent.....	46
3.	Modelování – praktická část .....	48
3.1.	Geometrie šnekového zařízení .....	48
3.2.	Síťování .....	52
3.3.	Simulace plného šneku .....	54
3.4.	Vyhodnocení viskozity 1 .....	58
3.5.	Vyhodnocení viskozity 2 .....	64
3.6.	Výpočet částečně zaplněného šnekového dopravníku .....	68
4.	Závěr.....	76
	Seznam obrázků .....	78
	Seznam tabulek .....	80
	Seznam použité literatury .....	81

# Seznam použitých symbolů

---

## Latinská písmena

$A$	konstanta pro Andradeův vztah	[Pa·s]
$B$	konstanta pro Andradeův vztah	[Pa·s]
$Br$	Brinkmanovo číslo	[-]
$c$	vůle mezi šnekem a kanálem	[m]
$c_H$	součinitel náklonu dopravníku	[-]
$C_p$	tepelná kapacita	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$d$	průměr jádra šneku	[m]
$D$	průměr šneku	[m]
$D_h$	hydraulický průměr	[m]
$D_t$	průměr kanálu	[m]
$e$	tloušťka listu šroubovice	[m]
$H$	hloubka kanálu	[m]
$I$	proud	[A]
$j$	elektrická proudová hustota	[A·m <sup>-2</sup> ]
$k$	koeficient pro rotační míchadla	[-]
$K$	koeficient konzistence	[Pa·s <sup>n</sup> ]
$L$	délka šneku	[m]
$\dot{m}$	hmotnostní tok	[kg·s <sup>-1</sup> ]
$M_k$	krouťící moment	[N·m]
$n$	index toku	[-]
$n$	otáčky	[RPM, s <sup>-1</sup> ]
$Nu$	Nusseltovo číslo	[-]
$p$	tlak	[Pa]
$P$	příkon	[W]
$\Delta p$	tlaková ztráta	[Pa]
$q$	hustota tepelného toku	[W·m <sup>-2</sup> ]
$q^{th}$	fáze VOF modelu	[-]
$\dot{Q}$	tepelný tok	[W]
$R$	poloměr	[-]
$R$	elektrický odpor	[ $\Omega$ ]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]
$s$	stoupání šroubovice	[m]
$S$	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$T$	teplota	[°C, K]
$Ta$	Taylorovo číslo	[-]
$u$	rychlost kapaliny	[m·s <sup>-1</sup> ]
$U^*$	bezrozměrná rychlost kapaliny	[-]
$v$	specifický objem	[m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]
$\dot{V}$	objemový tok	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
$W$	obvodová šíře	[m]
$x, y, z$	kartézské složky	[-]

## Řecká písmena

$\alpha$	součinitel přestupu tepla	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
$\alpha$	Arheniův koeficient	[-]
$\alpha_q$	objemový podíl	[-]
$\gamma$	smyková deformace	[-]
$\dot{\gamma}$	rychlost smykové deformace	$[\text{s}^{-1}]$
$\overline{\Delta}$	rychlost deformace	$[\text{s}^{-1}]$
$\eta$	zdánlivá viskozita	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
$\eta_0$	zdánlivá viskozita při nulové smykové rychlosti	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
$\theta$	bezrozměrná teplota	[-]
$\kappa$	poměr průměrů válců	[-]
$\lambda$	časová konstanta	[-]
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
$\mu$	dynamická viskozita	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
$\nu$	kinematická viskozita	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
$\rho$	hustota	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
$\rho_0$	specifický elektrický odpor vodiče	$[\Omega\cdot\text{m}]$
$\sigma$	povrchové napětí	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$
$\overline{\tau}$	dynamické napětí	[Pa]
$\tau$	dynamické napětí	[Pa]
$\varphi_t$	úhel stoupání šroubovice	[-]
$\psi$	součinitel plnění	[-]
$\omega$	vnitřní úhel	$[\text{°}]$
$\nabla$	Hamiltonův operátor	$[\text{m}^{-1}]$

## Seznam zkratk

---

HU	hnědé uhlí
MRF	Multiple reference frame
RPM	revolutions per minute
VOF	Volume of Fluid

# 1. Úvod

---

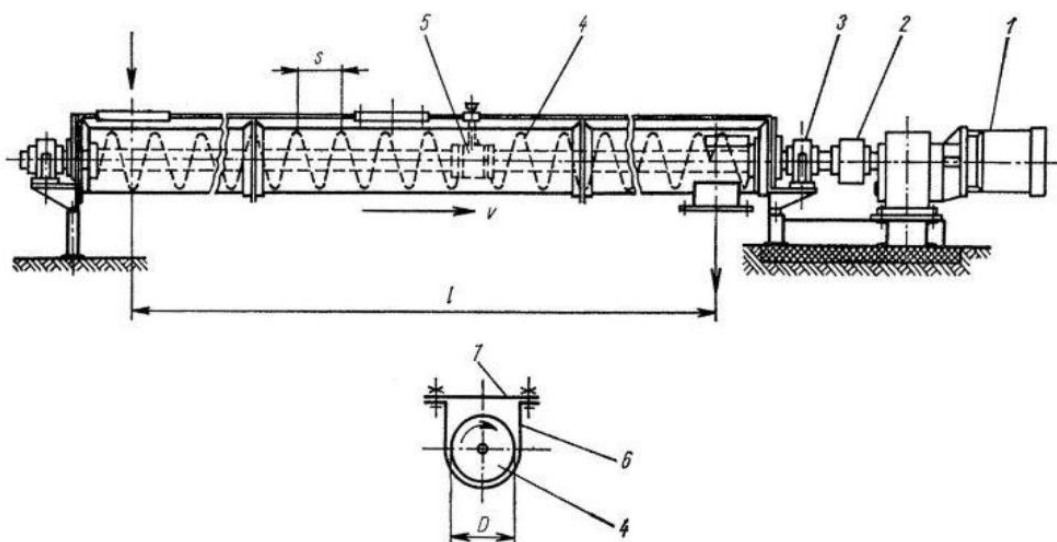
Generování tepla a jeho přenos jsou procesy, kterých se nelze při konání pohybu vyvarovat. U některých aplikací je teplo žádoucí a v některých není, a proto je nutné ho odvádět. Existují také případy, kdy je teplo žádoucí, ale přirozeně je ho málo, a tak je potřeba přivádět další. A takový přívod tepla lze zajistit různými způsoby. Pro šnekový extrudér jsou častým jevem topná tělesa umístěná na vnější stěně zařízení. Další možností je zdroj tepla zavedený přímo do ohřívané kapaliny. Tím zdrojem může být nějaký předmět, ku příkladu šnek, ohříváný elektricky. Objevují se i systémy, v podstatě takové výměníky tepla, kde pracovní látku ohřívá jiné médium, a tím médiem může být kapalina, horký vzduch, či dokonce pára [4].

V diplomové práci se budu věnovat problematice přestupu tepla mezi šnekem a kapalinou. Pod těmito slovy si lze představit mnoho. Já se hodlám zaměřit na konstantní hustotu tepelného toku na povrchu šneku a na viskózní kapalinu, která teplo ze stěny odebírá. V úvodní části práce uvádím praktickém využití šnekového zařízení. Zmíním spíše takový průřez aplikacemi, abych čtenáře zasvětil, kde se v praxi mohou s takovým zařízením potkat. V rešeršní části budu popisovat zjednodušené příklady přestupu tepla mezi deskami, či v mezikruží. Mým cílem je popsat bilanční rovnice a uvést výsledky vědeckých publikací. V praktické části se zaměřím na sestavení numerického modelu šnekového dopravníku s bezosým šnekem a provedení výpočtů s různými procesními parametry. Měněnými parametry budou například otáčky šneku či viskozita kapaliny. Cílem je získat informace o součiniteli přestupu tepla na povrchu šneku a příkonu potřebného na otáčení šneku. Stěžejní bude práce se softwarem ANSYS Fluent. Tento výpočetní nástroj je vhodným pomocníkem k řešení mého úkolu.



## 1.1. Šnekový dopravník

Jedná se o zařízení na přepravu sypkých, ale i tekutých materiálů. Dopravník má hned několik částí. Hlavním dílem je šnek. Jeho vlastnosti a geometrie jsou zásadní parametry pro funkci zařízení. Sestava dopravníku tedy může vypadat různě. Jedna varianta je na obrázku 1. Hřídel šneku je poháněna motorem a je uložena přes spojku a ložisko. Dále pokračuje šnek do žlabu a na jeho konci je hřídel opět uložena v ložisku. Celý žlab je pak zakryt víkem. Podmínkou je také vhodné nastavení vůle – štěrbin mezi šnekem a žlabem.



Obrázek 1: Šnekový dopravník. 1 – elektromotor, 2 – spojka, 3 -ložisko, 4 – šnek, 5 – vodící ložisko, 6 – žlab, 7 - víko [1].

Přívod materiálu je veden shora na začátku žlabu a odvod probíhá na konci spodem. Rotující šnek posouvá dopravovanou látku požadovaným směrem. V důsledku působení tíhy a tření materiálu o žlab nedochází ke společnému otáčení materiálu se šnekem.

### 1.1.1. Rozdělení dopravníků

Šnekový dopravník lze členit podle více kategorií:

A. podle toku materiálu

- vodorovné (horizontální)
- šikmé
- svislé (vertikální)

B. podle stoupání šroubovice

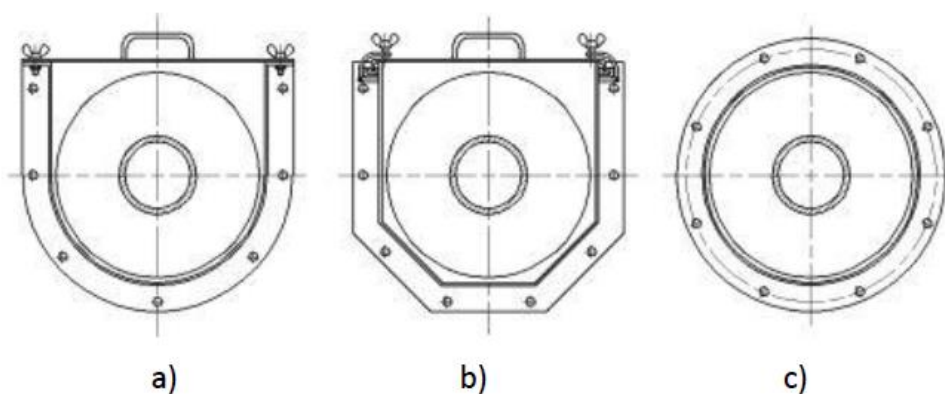
- pravotočivé
- levotočivé

C. podle počtu šneků

- jednošnekové
- vícešnekové

D. podle konstrukčního uspořádání

- trubkové
- korytové



Obrázek 2: Konstrukční uspořádání šnekového dopravníku. a), b) – korytové, c) – trubkový [2].

### 1.1.2. Rozdělení šneků

Kromě již zmíněného dělení podle stoupání šneku, existují různé konstrukční varianty. Šnek se skládá z hřídele a šnekovnice. Hřídel může být plná i dutá, ovšem v provozu se používá i tzv. bezosá šnekovnice. Spojení hřídele se šnekovnicí je v tomto případě pouze na prvním závitě. Takové řešení se aplikuje například pro viskózní či gumové materiály. Obrázek 3 zobrazuje velkou škálu konstrukčních řešení. Pro dopravu sypkých látek se běžně používají klasické varianty a). Pokud je nutné zároveň s dopravou vsádku míchat, pak je lepší pracovat s lopatkovými šneky (např. d), e)). Obvodová šnekovnice b) se doporučuje v případě tuhých, hustých, tekoucích a lepkavých materiálů, které na šneku mohou ulpívat. Někdy, když je šnek hodně dlouhý, se umístí výztužné ložisko doprostřed žlabu. Toto ložisko pak zabraňuje přílišnému průhybu hřídele [1].



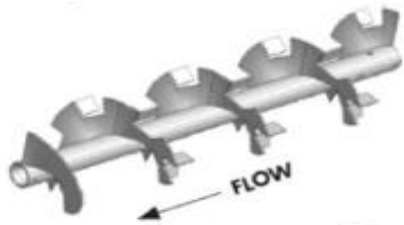
a) klasická plná šnekovnice  
(poměr  $s/D = 1$ )



b) obvodová šnekovnice



c) plná šnekovnice s výřezy



d) šnekovnice s výřezy a ohyby



e) šnekovnice s lopatkami



f) bezosá šnekovnice



g) hřídel s lopatkami



h) přerušovaná šnekovnice



i) šnekovnice s menším stoupáním (poměr  $s/D < 1$ )

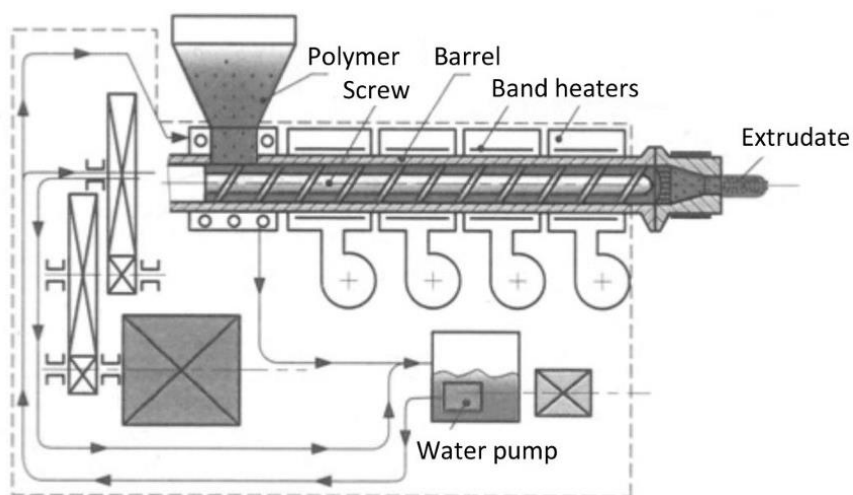
Obrázek 3: Konstrukční řešení šneků [3].

## 1.2. Vytlačování plastů

Speciálním příkladem použití šnekového dopravníku je vytlačování – extruze. Vytlačování je děj, který je využíván zejména pro zpracování polymerů. Tento proces je v současné době nenahraditelný. Velké množství plastových výrobků je produkováno právě pomocí vytlačovacího stroje. První extruder na termoplasty byl postaven v Německu v roce 1935 a zasloužil se o to Paul Troester. Již předtím se ale používal extruder pro vytlačování kaučuku, který byl vytápěn parou. Pro zpracování polymerů se používají různé typy vytlačovacích strojů. Nejčastější je šnekový, ale existuje i diskový či bubnový [4].

### 1.2.1. Jednošnekový vytlačovací stroj

Tento typ vytlačovacího stroje je významný právě při zpracování polymerů. Vyniká jednoduchou geometrií, spolehlivostí a solidním poměrem cena/výkon. Na obrázku 4 je schéma extruderu, které popisuje hlavní části stroje. Extruder se vždy skládá z násypky, šneku, tavící komory, vytlačovací hlavy, přídavného ohřevu, pohonu a chlazení. Součástí také mohou být ventilační otvory pro odvod inertů nebo další násypky, které se využívají při mísení více polymerů. Samozřejmostí jsou i prvky měření a regulace. Často je nutné hlídat teplotu procesu, průtok a tlakovou ztrátu [4].



Obrázek 4: Schéma vytlačovacího stroje [5]

Nejdůležitějším dílem je šnek. Šnek je vyráběn na míru pro každou aplikaci. V rámci návrhu šneku existuje mnoho parametrů, které lze optimalizovat. Při výběru vhodné

geometrie vždy záleží na typu zpracovávaného materiálu, stabilitě výstupních parametrů (teplota, tlak), požadovaného průtoku a počtu vstupů (= počtu příměsí). Šnek může mít nekonstantní průměr hřídele a stoupání šroubovice, různé výřezy a místní prvky, které zajišťují požadovaný výsledek.

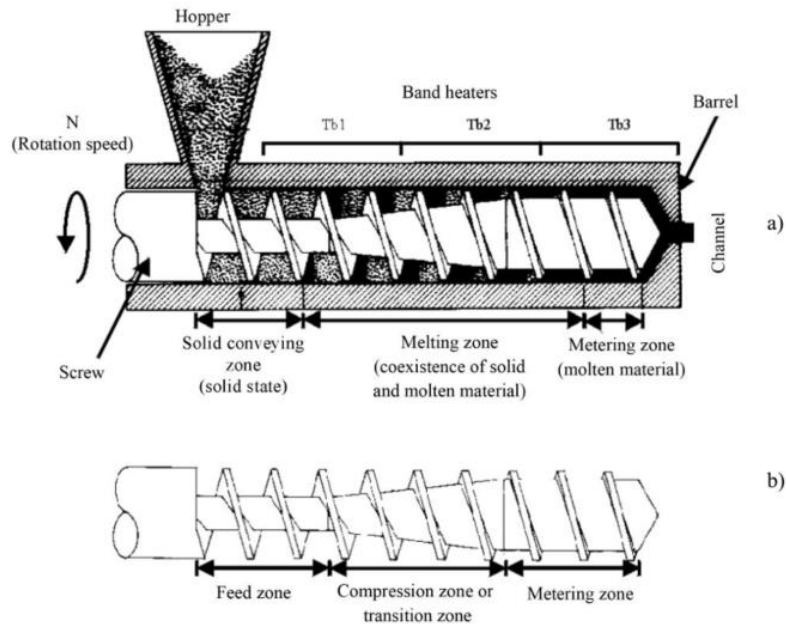
Zmínil jsem šnek s proměnným průměrem hřídele. Ten má 3 základní části. První část označovaná jako plnicí (vstupní, dopravní) je charakterizována nejmenším průměrem hřídele šneku. V této části dochází ke vstupu materiálu (granulí) do extruderu a následně k uspořádání granulí. Dále se zde polymer předejde a nataví. Druhá zóna je plastikační (kompresní, přechodová), hřídel zde lineárně zvětšuje svůj průměr, hloubka závitů se snižuje a narůstá tlak. Děj odehrávající se v plastikační zóně je zásadní. Správné nastavení šneku ovlivňuje tlak na konci šneku a od toho se odvíjí kvalitu výrobku. Poslední část je výstupní (homogenizační). Zde dochází k homogenizaci a dokončení plastifikace materiálu.

Velikost extruderu se udává poměrem  $L/D$ . Délka šneku je označena  $L$  a písmeno  $D$  značí průměr šneku. Hodnota  $L/D$  bývá od jednotek až po stovky, přičemž pro zpracování plastů se využívají extrudéry o velikosti  $L/D = 20-25$  (malé stroje),  $25-30$  (velké stroje) a  $10-17$  (rychloběžné stroje) [4].

### 1.2.2. Základní děje

Materiál v pevném skupenství vstupuje do komory přes násypku. Rotující šnek uvnitř statické komory v prvotní fázi usměrňuje tok materiálu. Pohybem vzniká tření, které generuje teplo. To je nutné k natavení polymeru. Množství tepla vzniklé z tření však většinou nestačí, a tak je nutné dodávat další. Variant, jak materiál ohřát na tavnou teplotu, je více. Mohou to být například topná tělesa umístěná na vnějším povrchu válce. Dalším řešením je zavedení zdroje tepla přímo do hřídele šneku. Šnek má několik zón, viz obrázek 5. Materiál se začíná natavovat v počátku plastikační zóny. Proces tavení poté probíhá až na konec šneku. Cílem je, aby za výstupní zónou byl polymer dokonale nataven, měl požadované vlastnosti a byl dokonale promíchán. Za šnekem následuje síto, které zachytává případné nečistoty. Za ním je lamač, který má za úkol usměrnit tok taveniny do vytlačovací hlavy. Vytlačovací hlava je s extruderem spojena přes přírubu nebo pomocí bajonetového spoje. Součástí hlavy jsou také vyhřívané patrony či pásy [4].

Tlak, respektive síla vyvinutá v kompresní části šroubu je nutná k dopravení polymeru skrz hlavu. Hlava totiž materiálu klade odpor. Tato rezistence vůči průchodu taveniny se stanoví tvarem dutiny, teplotou taveniny, průtokem dutinou a reologickými vlastnostmi taveniny. Tlak vytlačovací hlavy tedy není závislý na extruderu. Extruder však musí zajistit dostatečně velký tlak pro průchod materiálu hlavou [4].



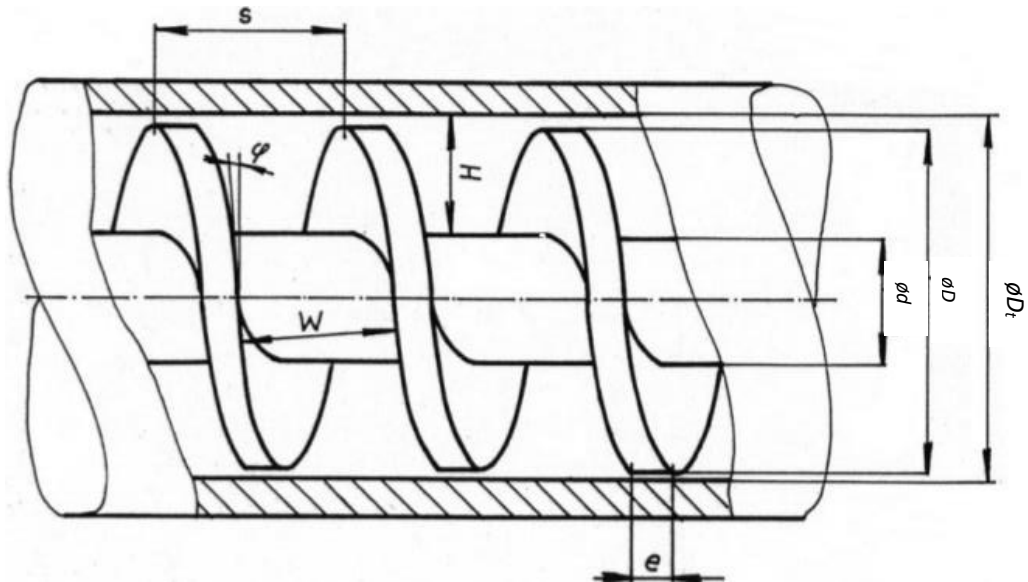
Obrázek 5: Hlavní zóny šneku [5]

### 1.2.3. Geometrie šroubu

Zde navážu na kapitolu 1.1 a zopakují některé geometrické údaje a přidám k nim další. Údaje se pojí s vytlačovacím strojem, který lze považovat za druh šnekového dopravníku (čerpadla). Následující obrázek 6 popisuje jeho základní geometrii. A toto jsou hlavní parametry:

- průměr kanálu  $D_t$
- průměr šneku  $D$
- průměr jádra šneku (hřídele)  $d$
- stoupání šroubovice  $s$
- tloušťka listu šroubovice  $e$
- úhel stoupání šroubovice  $\varphi_t$

- hloubka kanálu  $H$
- obvodová šíře  $W$
- vůle mezi šnekem a kanálem  $c$



Obrázek 6: Geometrie šroubového čerpadla [6]

Základní parametry šrouby jsou průměry  $D_t$ ,  $D$ ,  $d$ , stoupání šroubovice  $s$ , délka  $L$  a tloušťka  $e$ . Ostatní parametry lze vypočítat z těch, které jsem nyní uvedl [6].

$$\text{obvodový úhel stoupání} \quad \varphi_t = \arctg\left(\frac{s}{\pi \cdot D_t}\right) \quad (1)$$

$$\text{hloubka kanálu} \quad H = \frac{D_t - d}{2} \quad (2)$$

$$\text{obvodová šíře} \quad W = (s - e) \cdot \cos \varphi_t \quad (3)$$

$$\text{vůle mezi šnekem a válcem} \quad c = \frac{D - d}{2} \quad (4)$$

Tvar šneku bývá buď konvenční, anebo diferenciální. Při změně průměru (hloubky drážky závitu) získává extruder specifický kompresní poměr. Ten je dán jako poměr objemu jednoho stoupání závitu šroubovice na vstupu k objemu závitu na výstupu. Avšak udává se i jako poměr hloubky drážky na vstupu ku hloubce drážky na výstupu. Tok materiálu je výsledkem kontaktu polymeru se stěnou tavící komory. Pokud se materiál přilepí na šnek, tak extruze probíhat nebude. Výkon zařízení lze zlepšit různými úpravami až uš šroubu nebo komory [5].

Existují některé metody vedoucí ke zlepšení procesu extruze. Ke zvýšení dopravní kapacity pevného materiálu lze tavicí komoru udělat drážkovanou. Drážkováním se zlepšuje přilnavost materiálu ke stěně komory. Pokud bychom chtěli navýšit tavicí kapacitu, tak lze použít šroub se zářkami. To opět vede k lepšímu styku materiálu s válcovou částí extruderu. Další úpravou je mixážní hlava, která zajistí vyšší výkon míchaní [5].

## 1.3. Pyrolýza

Pyrolytických reaktorů existuje celá řada. Jedním z používaných je právě šnekový dopravníkový reaktor. Úvodem bych chtěl zmínit několik faktů k historii této technologie. První větší využití pyrolýzy se datuje do 19. století, nicméně hlavní rozmach nastal v následujícím století a zapříčinila to zejména 2. světová válka. Tehdy byl nedostatek pohonných hmot a důležitým zdrojem se stalo hnědé uhlí. A právě zplyňováním uhlí byl vyráběn kýžený produkt. Nástup ropy a jejích produktů znamenal úpadek pyrolýzy. Nový dech pyrolýze navrátilo 21. století. Vědci a společnosti hledají možnosti, jak efektivně zpracovávat odpad a vytvářet z něj hodnotný produkt, a tak snížit dopady na životní prostředí [7].

### 1.3.1. Charakteristika a dělení

Pyrolýza se řadí mezi fyzikálně – chemické děje. Proces probíhá bez přístupu vzduchu, tedy anaerobně, v reaktoru. Reaktorem může být například tepelně izolovaná nádoba se šnekovým dopravníkem. Zpracovávaným materiálem může být biomasa, komunální odpad, plast, či již zmiňované uhlí. Při zpracování materiálu dochází k uvolnění těkavých látek, rozkladu vysokomolekulárních látek na nízkomolekulární a dlouhé řetězce molekul se štěpí na kratší [7].

Kategorizace podle času udává 2 metody. Při tzv. pomalé pyrolýze se vyrábí především dřevěné uhlí. Během rychlé pyrolýzy je hlavním produktem kapalina neboli pyrolýzní olej.



Dále se rozlišují 3 stupně pyrolýzy členěné podle reakční teploty [7]:

- nízkoteplotní – reakční teplota < 500 °C
- středněteplotní – reakční teplota 500 – 800 °C
- vysokoteplotní – reakční teplota > 800 °C

V prvním stádiu při teplotách okolo 150 °C dochází k odpaření zbytkové vody. Surovina musí být zbavena vlhkosti. Dále může docházet k uvolnění prvních těkavých par. Mezi teplotami 300 – 500 °C se uvolňují dehtové páry a také vodní pára a CO<sub>2</sub>. Vzniká také methan. Při teplotách nad 500 °C klesá produkce par a v reaktoru naopak zůstává tuhý zbytek (polokoks). Teploty vyšší než 600 °C zapříčiní odvod pouze plynných produktů a polokoks se v konečné fázi mění na koks.

Pyrolýza je charakterizována mnoha chemickými pochody:

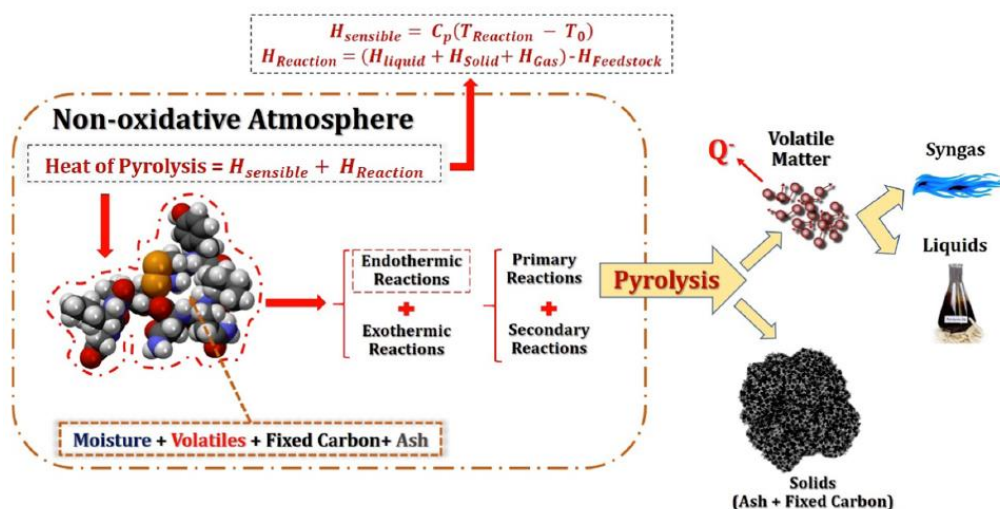
- štěpením vysokomolekulárních látek;
- polymerací nízkomolekulárních látek;
- kondenzací a polykondenzací;
- cyklizací;
- izomerací;
- dehydrogenací;
- hydrogenací.

Obecně lze pyrolýzu označit za exotermickou reakci. Teplo pro přeměnu musíme dodávat [7,8].

### 1.3.2. Produkty pyrolýzy

Na výstupu z reaktoru jsou tedy pevné (polokoks, koks), kapalné (dehet, střední olej, karbonizační benzín, pyrolýzní voda) i plynné složky (pyrolýzní plyn). Kvalita požadovaného produktu závisí na podmínkách procesu (teplota, tlak, rychlost ohřevu, doba zdržení, geometrie reaktoru), ale i na vstupní surovině (zejména na vlhkosti).

Dříve se předpokládalo, že velikost částic a doba setrvání par v reaktoru hraje významnou roli na výtěžnost produktu. Později se ukázalo, že to příliš neplatí. Na tyto parametry je však citlivé složení ropy. Důležitým faktorem je přenos tepla uvnitř reaktoru. Zpráva, ze které nyní vycházím, hovoří o zpracování biomasy a velikost částic byla 5 mm. Výtěžnost pyrolýzního oleje v laboratorních, či poloprovozních zařízeních dosahovala maximálně 70 %. Aby se zamezilo ztrátám, tak vznikající odpadní teplo lze využít pro vysoušení vstupní suroviny či výroby topné páry [7].

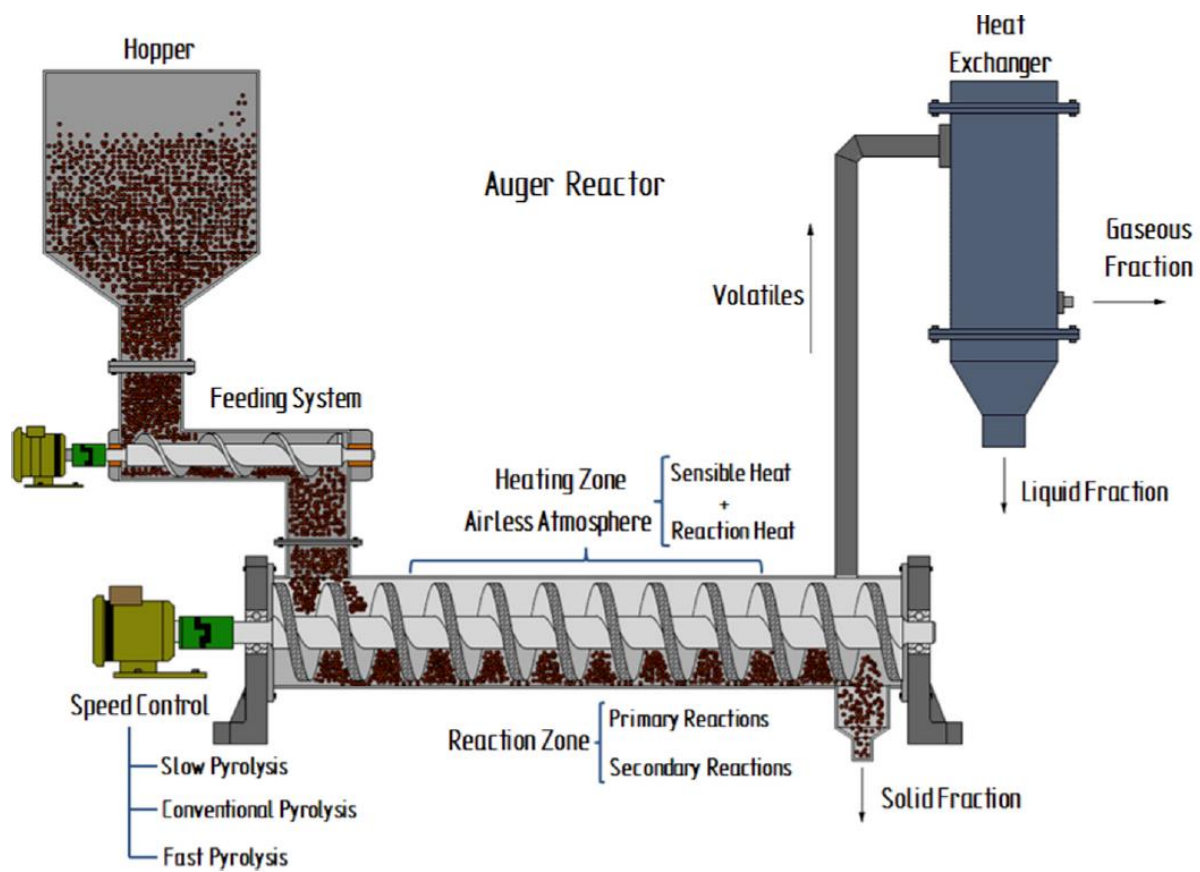


Obrázek 7: Schéma fyzikálně – chemických pochodů [3].

### 1.3.3. Využití pyrolýzního oleje

Pyrolýzní olej je lákavý produkt. Lze najít údaj, že výhřevnost pyrolýzního oleje z biomasy se pohybuje mezi 16–19 MJ/kg. Pro srovnání výhřevnost paliva HU tříděné – Most je 17,18 MJ/kg. Odtud lze odvodit, že jedním z upotřebení oleje je spalování spolu s HU. Avšak nejen s ním. Olej se používá jako palivo v kogeneračních jednotkách, kde se spaluje se zemním plynem. Představuje také alternativu ke kapalným produktům ropy [9,10].

Jak již bylo zmíněno, pyrolýza je exotermický děj. Pro nastartování procesu je v případě zpracování pneumatik nutné dodat energii 1,77 MJ/kg. Pokud je vstupní surovina plast, tak je nutných 4,67 MJ/kg. Nicméně energie ze vzniklého pyrolýzního oleje je mnohonásobně vyšší. Uvádí se, že olej z pneumatik má výhřevnost 44 MJ/kg. Pro srovnání výhřevnost motorové nafty je 42,61 MJ/kg [10,11].



Obrázek 8: Pyrolýzní jednotka se šnekovým dopravníkem [3].

## 2. Literární rešerše

---

V této části se věnuji samotnému přestupu tepla. Předkládám informace k danému tématu a zmiňuji výsledky vědeckých prací. Čerpám z publikací zabývajících se dopravou viskózních kapalin, ohřevem kapalin a přestupem tepla.

### 2.1. Rozdělení kapalin

Tekutiny se dělí na stlačitelné a nestlačitelné. Kapaliny, které jsou členěny na newtonské a nnewtonské, se řadí mezi nestlačitelné. Existuje několik rovnic popisujících hybnost kapalin, nicméně v této práci se zabývám hlavně viskozitou, třením a disipací mechanické energie. U tekutin závisí dynamické napětí na rychlosti deformace.

Vědní disciplína zabývající se závislostí mezi napětím a deformací se nazývá reologie. Reologické chování kapalin, jak je patrné i z následujících kapitol, hraje významnou roli v mnoha technologických operacích [12][13].

#### 2.1.1. Newtonská kapalina

Pro newtonské kapaliny platí tzv. Newtonův zákon. Jeho tvar je v rovnici (5) Kde  $\vec{\tau}$  je tenzor dynamických napětí,  $\mu$  je konstanta úměrnosti označovaná jako dynamická viskozita a  $\vec{\Delta}$  je tenzor rychlosti deformace. Závislost je lineární.

$$\vec{\tau} = 2\mu\vec{\Delta} \quad (5)$$

Každá kapalinu má svoji viskozitu. Například hodnota dynamické viskozity vody  $\mu$  při 20 °C je  $1 \cdot 10^{-3}$  Pa·s. A naopak velmi koncentrované roztoky mohou mít tuto hodnotu větší až o 6 řádů. Viskozita je většinou závislá na teplotě, kdy s rostoucí teplotou klesá. Jedním ze vztahů popisujících tuto závislost je Andradeův vztah (6), kde  $A$  a  $B$  jsou konstanty určené pro každý materiál experimentálně a  $T$  je termodynamická teplota [12].

$$\mu = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (6)$$

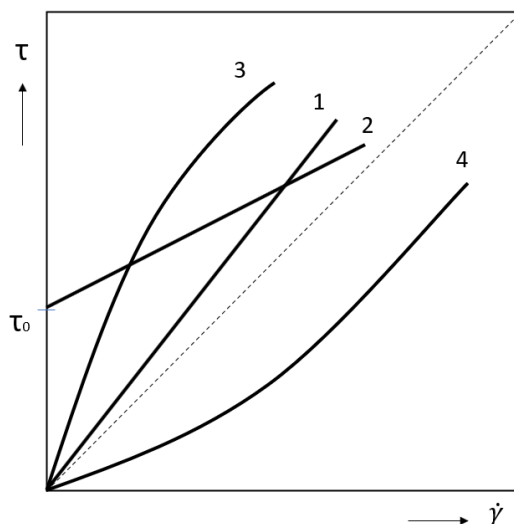
## 2.1.2. Nenewtonská kapalina

Kapaliny, které nelze popsat Newtonským zákonem se nazývají nenewtonské. Místo dynamické viskozity se v rovnici (7) objevuje tzv. zdánlivá viskozita  $\eta$ . Tato veličina je závislá na druhém invariantu ( $\bar{II}$ ). Takový vztah, či lépe řečeno model, je v rámci nenewtonských čistě viskózních tekutin nejjednodušší, ale zároveň nejpoužívanější. Nazývá se mocninovým modelem (Power law) a je popsán v rovnici (7). Dalšími prvky v rovnici jsou konstanty, a to koeficient konzistence  $K$  a index toku  $n$  [12].

$$\eta = K \left| \sqrt{2 \bar{II}} \right|^{n-1} \quad (7)$$

Tyto konstanty jsou specifické pro každou kapalinu. Pokud je  $n < 1$ , tak se jedná o látku pseudoplastickou. Při  $n > 1$  se hovoří o tzv. dilatantní látce. Pro doplnění, pokud se index toku rovná jedné, tak je řeč o newtonské kapalině.

Rovnice (7) obsahuje dvě konstanty. Tento model ovšem špatně popisuje viskozitu pseudoplastických kapalin při nízkých rychlostech deformace. Proto se zavedl tříkonstantový model s  $\tau_0$ . Obrázek 9 ukazuje změnu napětí s rychlostí deformace pro čtyři druhy látek [12].



Obrázek 9: Graf napětí na rychlosti deformace. 1-Newtonská kapalina, 2-Binghamská, 3-pseudoplastická, 4-dilatantní.

## 2.2. Přenos tepla

Bez tepla nelze provozovat vytlačovací stroj. Přirozeným zdrojem tepla je tření materiálu během procesu. To však nemusí stačit a je nutné přivádět další. Existují tři druhy přenosu tepla. Konvekce (proudění), kondukce (vedení) a sálání (záření). Z druhého zákona termodynamiky vyplývá, že teplo proudí z míst o vyšší teplotě do míst o nižší teplotě. Mechanismus kondukce se uplatňuje v pevných látkách. V tomto případě je nutná blízkost molekul. V tekutinách je naopak významný přenos tepla prouděním (konvekci). Sálání využívá přenos ve formě elektromagnetických vln [4].

### 2.2.1. Přenos tepla vedením

Pro přenos tepla kondukcí platí Fourierův zákon. Rovnice (8) popisuje tzv. měrný tepelný tok  $\vec{q}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ], nebo také vektor hustoty tepelného toku.

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (8)$$

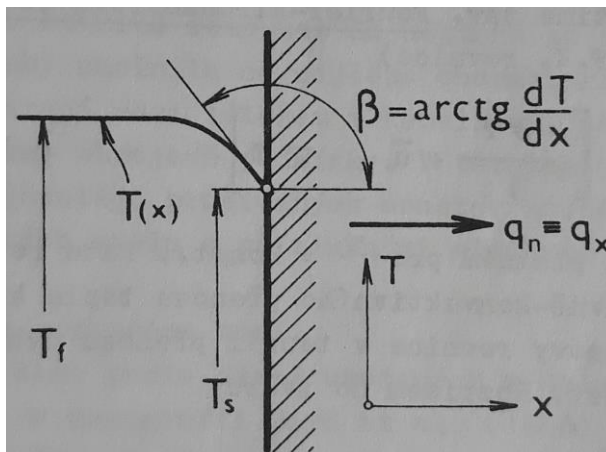
Koeficient  $\lambda$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] vyjadřuje tepelnou vodivost materiálu. Teplotní gradient  $\nabla T$  značí derivaci teploty podle souřadnice a ukazuje, jak se mění teplota v závislosti na poloze. Pokud hustotu tepelného toku  $q$  vynásobíme plochou  $S$  [ $\text{m}^2$ ] (kolmou na tok tepla), tak získám tepelný tok  $\dot{Q}$  [ $\text{W}$ ]. Rovnice lze rozepsat do všech tří složek ( $x, y, z$ ) a v určitém okamžiku tak stanovit v každém místě teplotního pole teplotní tok. Pro výpočet přenosu tepla kondukcí je nutné znát  $\lambda$  materiálu, rozdíl teplot a průřez. Přestup tepla může být analogií pístového toku [12].

### 2.2.2. Přenos tepla prouděním

Tento způsob se uplatňuje při makroskopickém pohybu spojitého prostředí, tedy v tekutinách. Kondukce se dělí na volnou (přirozenou) a nucenou. Konvekce je přirozená, když je k dispozici jen rozdíl teplot. Konvekce se stává nucenou tehdy, když je v systému např. čerpadlo, které vyvolá proudění. Existuje empirický vztah, který je označován jako Newtonův ochlazovací zákon. Tento vztah definuje hustotu tepelného toku  $q$ , respektive

součinitel přestupu tepla  $\alpha$ . Je popsán v rovnici (9) a  $T_f$  je teplota tekutiny a  $T_s$  je teplota stěny aparátu. Doprovodná skica je na obrázku 11 [12].

$$q = \alpha \cdot (T_f - T_s) \quad (9)$$



Obrázek 10: Průběh teploty v blízkosti stěny [12].

Množství tepla přenesené plochou  $S$  vyjadřuje vztah (10).

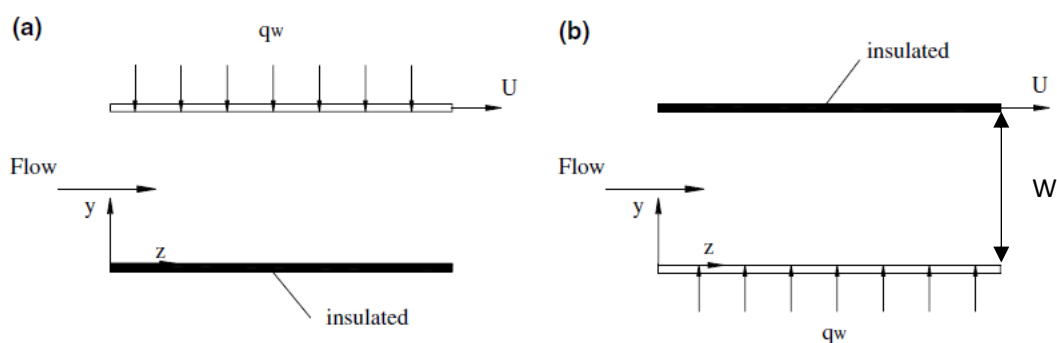
$$\dot{Q} = q \cdot S \quad (10)$$

Řešení přestupu tepla nelze nalézt bez okrajových podmínek. Podmínek existuje vícero, ale často se používají první čtyři. Pokud je v určitém místě tělesa zadána teplota jako funkce souřadnic, tak se jedná o okrajovou podmínku prvního druhu (I). Okrajová podmínka druhého druhu (II), která má v mé práci prioritu, souvisí s konstantní hustotou tepelného toku  $q$  na stěně. Během procesu (experimentu) se mění povrchová teplota stěny, ale teplotní gradient zůstává stejný. Okrajová podmínka druhého druhu se v praxi využívá např. při elektrickém ohřevu (Joulovo teplo). Třetí podmínka (III) se týká spojitosti hustot tepelných toků, kdy teplo přivedené tělesu kondukcí je rovno teplu odvedeného z prostředí konvekcí. A poslední důležitá podmínka, tedy čtvrtá (IV), říká, že v místě kontaktu dvou prostředí o různých tepelných vodivostech musí opět platit spojitost hustot tepelných toků. V práci se zabývám tokem vazké homogenní kapaliny [12].

## 2.3. Přestup tepla mezi paralelními deskami

Vůle mezi šroubem a válcovou stěnou lze zjednodušit na vůle mezi dvěma paralelními deskami. Lze počítat statický případ, kdy obě desky stojí, nebo případ, který je samozřejmě i bližší šnekovému dopravníku, kdy se jedna deska pohybuje.

Aydin a Mete (2006) se analytickým způsobem zabývají přestupem tepla mezi dvěma paralelními deskami, z nichž jedna se pohybuje. Tok je v laminárním režimu, je zahrnuta disipace vlivem viskozity a jako podmínka na stěně je zvolena konstantní hustota tepelného toku  $q_w$ . Na obrázku 11 jsou vidět dva uvažované případy. Tento druh toku s přestupem tepla se nazývá Couette-Poiseuilleův a je významný například právě při extruzi.



Obrázek 11: Okrajová podmínka na stěně. a) spodní deska je izolovaná, horní pohybující se deska s konstantní hustotou tepelného toku, b) spodní deska s konstantní hustotou tepelného toku, horní deska je pohyblivá a izolovaná [14].

Je uvažováno ustálené plně vyvinuté laminární proudění. Axiální vedení tepla v kapalině a ve stěně je zanedbáno, jedná se tedy o 1D situaci. Rovnice (11) představuje výpočet konstantního toku tepla na stěně  $q_w$ . Rovnice je oproti výrazu v publikaci modifikována. Symbolem  $\lambda$  nahrazuji symbol  $k$  představující tepelnou vodivost.

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=w} = q_w \quad (11)$$

Rovnice (12) prezentuje Brinkmanovo číslo  $Br$ , kde  $\mu$  je dynamická viskozita,  $u_m$  střední rychlost kapaliny,  $W$  šíře kanálu a  $q_w$  právě zmiňovaný tepelný tok. V rovnici (13) je výpočet součinitele přestupu tepla. Rovnice je opět upravena a  $h$  je nahrazeno symbolem  $\alpha$ .



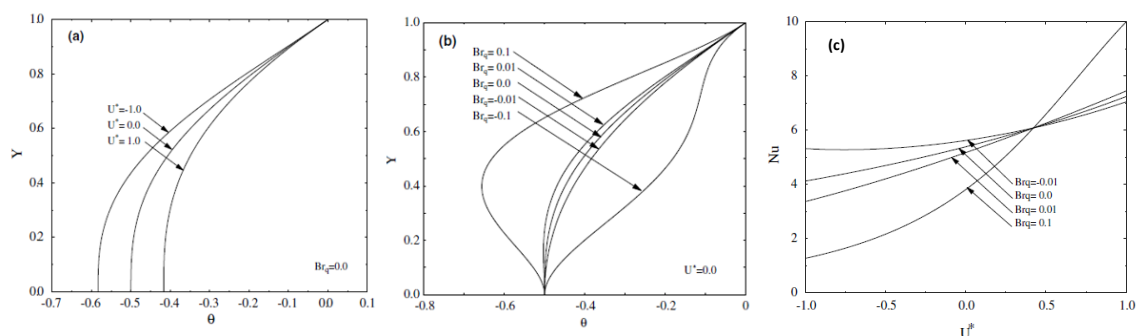
$$Br = \frac{\mu \cdot u_m^2}{2 \cdot W \cdot q_w} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{q_w}{T_w - T_m} \quad (13)$$

Nusseltovo číslo bylo stanoveno pomocí rovnice (14)

$$Nu = \frac{q_w \cdot W}{(T_w - T_m) \cdot \lambda} \quad (14)$$

Brinkmanovo číslo je ukazatelem, zda je nutné kapalinu ohřívat či chladit. Z článku vyplývá, že při  $Br < 0$  je nutné kapalinu chladit a při  $Br > 0$  naopak ohřívat. Pokud je  $Br = 0$ , tak se nezohledňuje disipace. V případě, že disipaci uvažujeme a kapalina je zároveň ohřívána konstantním tepelným tokem, tak je menší teplotní rozdíl mezi teplotou stěny a teplotou kapaliny. Obrázek 12a) ukazuje průběh bezrozměrných teplot  $\theta$  při  $Br = 0$ , tedy nulové disipaci a třech variantách posuvu desky. Kde  $U^* = -1$ , představuje pohyb desky ve směru  $-z$ ,  $U^* = 0$  znamená, že se deska nepohybuje a  $U^* = 1$  je deska pohybující se ve směru  $z$ . Obrázek 12b) zobrazuje průběh teplot  $\theta$  při kladném i záporném  $Br$ . Na obrázku 12c) je vidět, jak se mění Nusseltovo číslo. Nusseltovo číslo klesá s rostoucím  $Br$  až do hodnoty rychlost  $U^* = 0,422$ . Tam přichází zlom a chování je opačné [14].



Obrázek 12: Průběh  $\theta$  v kanále. a)  $Br = 0$ , různé  $U^*$ , b)  $U^* = 0$  a různá  $Br$ , c) průběh  $Nu$ , různá  $U^*$  a různá  $Br$  [14].

## 2.4. Přestup tepla v mezikruží

Při studiu problematiky přestupu tepla mezi šnekem a kapalinou jsem narazil na různé články. Nejčastěji jsem však nacházel publikace zabývající se vytlačovací stroje a pyrolýzními reaktory. Jednotlivé aplikace jsou více či méně složité a články popisují experimentální jednotky i zařízení v běžném provozu. Výsledky některých experimentů zmíním v následujících odstavcích.

Fénot a kol. (2011) shrnují typy proudění mezi dvěma soustřednými válci. Autoři zmiňují a popisují Taylor-Couetteův či Couette-Poiseuilleův tok a přestup tepla. V obou případech se jedná o tok v mezeře. Objevují se geometrické parametry jako například hydraulický průměr  $D_h$  či radiální poměr průměrů válců. Parametry charakterizující tok jsou například Reynoldsovo číslo  $Re$  nebo Taylorovo číslo  $Ta$ . Reynoldsovo číslo je definováno v rovnici (15), kde  $u$  je rychlost kapaliny,  $D_h$  již zmiňovaný hydraulický průměr a  $\nu$  je kinematická viskozita. Druhé vyjádření  $Re$  je v rovnici (16) a parametr  $n$  značí otáčky,  $\rho$  je hustota látky,  $D$  charakteristický rozměr a  $\mu$  je dynamická viskozita. Rovnice (16) se také běžně používá ke stanovení režimu toku u míchacích systémů

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (15)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot D^2}{\mu} \quad (16)$$

Slovní definice  $Re$  je taková, že se jedná o poměr mezi setrvačnými a vazkými silami. Význam Taylorova čísla je podobný (17). Čitatel má význam odstředivé síly.

$$Ta = \frac{n^2 \cdot R_1 \cdot (D_h/2)^3}{\nu^2} \quad (17)$$

Přestup tepla je popsán Nusseltovým číslem  $Nu$ , viz rovnice (18). Vyjádření se oproti rovnici (14) vizuálně liší, ale význam je stejný. Jednotlivé veličiny již zde byly definovány. Jen dodám, že  $L$  vyjadřuje charakteristický rozměr. Charakteristický rozměr může být i průměr šneku  $D$ . Význam Nusseltova čísla je takový, že se jedná o poměr konvektivního a konduktivního přenosu tepla.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (18)$$

Pro výpočet  $Nu$  existuje velké množství korelací. Jsou to kombinace bezrozměrných veličin, v mnoha případech jejich součin, jak je vidět na následujícím obrázku 13[15].

	$\eta$	$e/R_1$	$\Gamma$	$Re_c$	$T_a$	C.L. thermique	$\Delta T$	Correlation
Tachibana and Fukui [41]	0.75 → 0.937	0.03 → 0.17	2.25 → 11.25	380 → 4200	71 → 3400	Variables	Rotation: $T_1 - T_2$ Axial flow: $T_1 - T_{mean}$	Rotation: $Nu = 0.092(TaPr)^{1/3}$ Axial flow: $Nu = ARe_c^{0.8}Pr^{1/3}$ and $A = 0.015(1 + 2.3(D_h/L))\eta^{-0.45}$ Global: $\phi = \phi_r + \phi_s$
Kuzay and Scott [62]	0.571	0.75	12	$1.5 \times 10^4 \rightarrow 6.5 \times 10^5$	$4.87 \times 10^9 \rightarrow 8.65 \times 10^9$	Heated stator Insulated rotor	$T_1 - T_2$	Axial flow: $Nu_0 = 0.022Re_c^{0.8}Pr^{0.5}$ Global: $Nu = Nu_0(1 + \beta^2)^{0.87}$ $\beta = (1/\pi)(D_h/R_1)(\omega R_1/V_a)$
Nijaguna and Mathiprakasam [37]	0.75	0.165	195	293 → 1995	$0 \rightarrow 3.6 \times 10^5$	Insulated stator Heated rotor	$T_1 - T_2$	Global: $\sigma = Ta/Ta_c$ $1 < \sigma < 4.817$ : $Nu = 4.294\sigma^{0.4845}$ $\sigma > 4.817$ : $Nu = 5.08\sigma^{0.3507}$
Kosterin and Finat'ev [67]	0.78	0.0271	77.5	$3.10^4 \rightarrow 3 \times 10^5$	$0 \rightarrow 8 \times 10^5$	Insulated stator Heated rotor	$T_1 - T_{mean}$	Global: rotor: $Nu = 0.018 Re_{eff}^{0.8}$ $Re_{eff} = (Re_a^2 + 0.6Re_{in}^2)^{1/2}$
Grosgeorges [45]	0.98	0.02	200	9900 → 26,850	$1.4 \cdot 10^5 \rightarrow 4.9 \times 10^5$	Insulated stator Heated rotor	$T_1 - T_{mean}$	Rotor: Global: $Nu = 0.023\psi(Re_a)Pr^{1/3}Re_{eff}^{0.8}$ with $\psi(Re_a) = 0.16Re_a^{0.175}$ and $Re_{eff} = (Re_a^2 + 0.8Re_{in}^2)^{1/2}$
Childs and Turner [61]	0.869	0.15	13.3	$1.7 \cdot 10^5 \rightarrow 13.7 \times 10^5$	$6.10^7 \rightarrow 12 \times 10^{10}$	Insulated stator Heated rotor	$T_1 - T_2$	Axial flow: $Nu = 0.023Re_a^{0.8}Pr^{0.5}$ Global: $((Nu - Nu_c)/Nu_c) = 0.068(\omega R_1/V_a)^2$
Simmers and Coney [54]	0.955 and 0.8	0.024 → 0.124	65 → 288	400 → 1200	$10^4 \rightarrow 2 \times 10^6$	Heated stator Insulated rotor	$T_2 - T_m$	Stator: $Nu = \frac{4 \cdot Pr \cdot Re_c^{0.5} \cdot Ta^{0.3675}}{B(A\eta/(1-\eta))^{1/2} \cdot (\eta/1-\eta)^{1/4} \cdot Ta_c^{0.6175}}$ with $B = Pr \cdot \{1 + Pr \cdot [\exp(\frac{2}{3}\eta/(1-\eta))]^{1/4}\}$ $(A\eta/(1-\eta))^2 = 1/2 Re_c^{0.5} Ta^{0.1325} \cdot Ta_c^{0.1175} - 1$ and $A = \frac{1 + \eta^2 + (1 - \eta^2)/\ln(\eta)}{2 + (1 - \eta^2)/\ln(\eta)}$

Obrázek 13: Korelace pro výpočet Nusseltova čísla [15].

## 2.4.1. Přestup tepla s konstantní hustotou tepelného toku

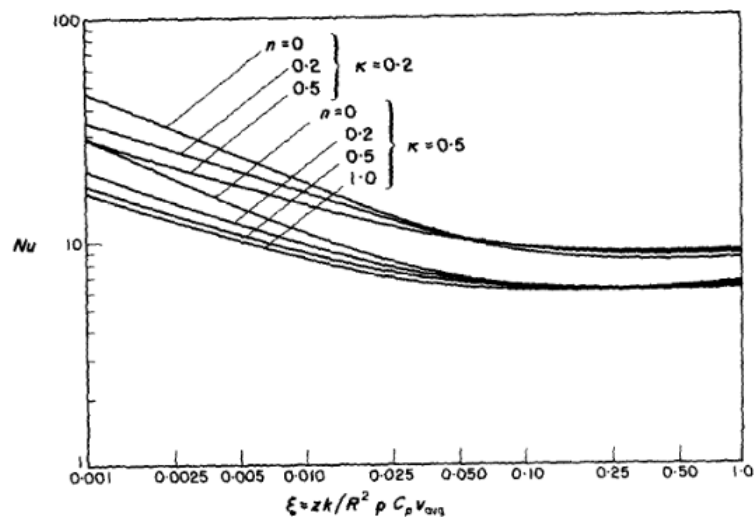
Jak jsem již zmínil výše, okrajová podmínka druhého druhu se pojí s konstantní hustotou tepelného toku. Může být dána i jako funkce polohy nebo času. Matematicky ji lze vyjádřit takto:

$$q_x |_{x=0} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} |_{x=0} = q_0 \quad (19)$$

Při tomto jevu se mění teplota povrchu, ale teplotní gradient zůstává konstantní. V tomto případě je konstantní hustotou tepelného toku ohříváno okolí. Existuje však i případ, kdy je povrch stěny dokonale izolovaný a pak se hodnota  $q$  rovná nule. V mé práci využiji oba případy, jelikož stěna šneku je elektricky ohřívána, má tedy konstantní hustotu tepelného toku  $q$ , kdežto válcová stěna okolo šneku je dokonale izolovaná [12].

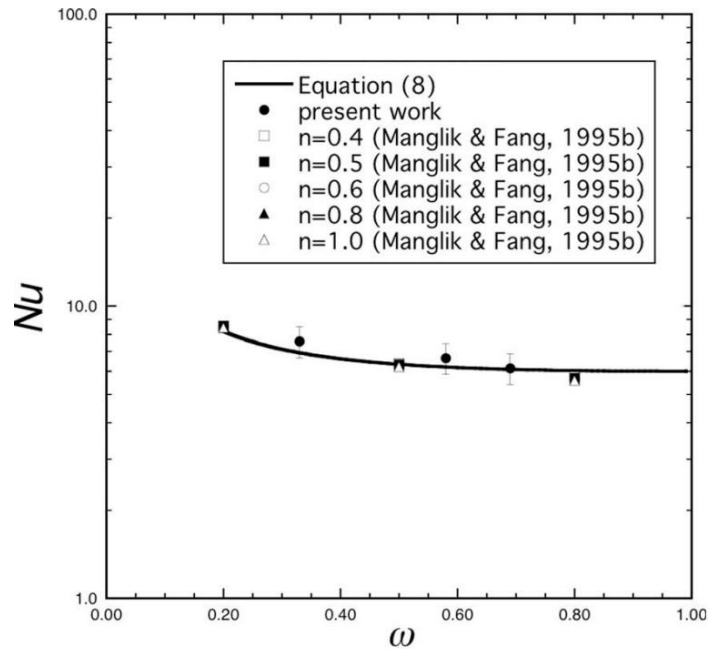
Pánové Hong a Matthews (1969) se ve své práci zabývali přestupem tepla v mezikruží. Zkoumali neneutonskou kapalinu v laminárním režimu a výstupem je Nusseltovo číslo  $Nu$  jako závislost na bezrozměrné délce, indexu toku  $n$ , či poměru průměrů válců  $\kappa$ . Počítali tři případy. Nicméně já se zaměřím jen na variantu A, tedy s podmínkou konstantního tepelného toku na stěně vnitřního válce a s izolovaným vnějším válcem.

Na obrázku 14 se nachází výsledná závislost. Měřítka na vertikální ose je v logaritmických souřadnicích. Hodnota  $Nu$  klesá s rostoucím indexem toku. Naopak přímá úměra platí pro  $Nu$  a mezeru mezi válci. Čím menší mezera, tím nižší bezrozměrné kritérium  $Nu$  [16].



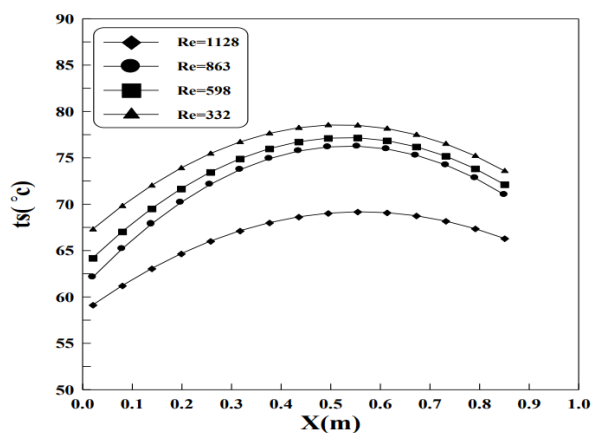
Obrázek 14: Nusseltovo číslo a závislost na bezrozměrné délce, indexu toku a poměru průměrů válců [16].

Výslednou závislost na obrázku 15 potvrzuje další experiment, kde Farias a kol. (2009) simulovali přestup tepla v plně vyvinutém laminárním toku viskoplastické kapaliny mezikružím.



Obrázek 15: Průběh Nusseltova čísla v závislosti na poměru průměrů [17].

V publikaci od Shkarah a kol. (2011) se autoři zabývají prouděním v horizontální mezeře. Předpokládají ustálený laminární tok s konstantní hustotou tepelného toku na stěně vnitřní trubky. Sledují, jak se mění teplota stěny podél osy. Data jsou vyhodnocena pro různá  $Re$  a pro různé hustoty tepelného toku. Dále ukazují rychlostní profil napříč mezerou. Obrázek 16 zobrazuje právě teplotu stěny podél osy při různých  $Re$  a konstantní hodnotě  $q = 241 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Z diagramu zároveň vyplývá, že vyšší hodnota  $Re$  přispívá k nižší teplotě stěny.

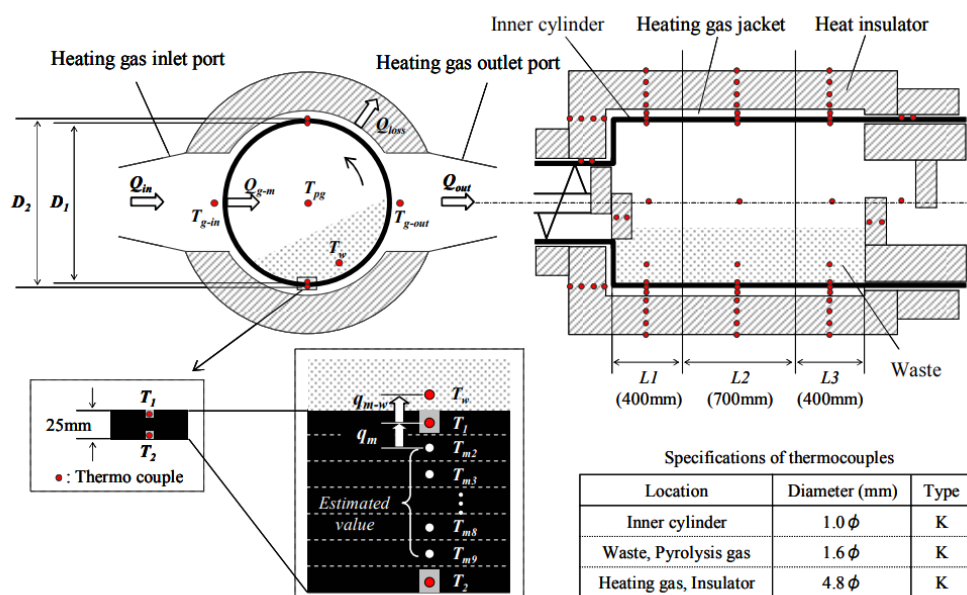


Obrázek 16: Teplota stěny podél osy v závislosti na měnícím se  $Re$  a konstantní hustotě tepelného toku [18].

Dalším poznatkem této publikace je fakt, že vyšší nastavená hustota tepelného toku znamená vyšší ohřev stěny podél osy.

Při studiu problematiky přestupu tepla jsem našel článek od Suzuki a kol. (2008), jehož výstupem je součinitel přestupu tepla  $\alpha$  mezi ohřívanou stěnou a materiálem. Nejprve nastíním podmínky samotného experimentu. Zařízení slouží k ohřevu odpadu a následné pyrolýze. Odpad se skládal z papíru, dřeva nebo polypropylenu. Zpracovávaný materiál je pomocí šnekového dopravníku přiváděn do válce (pece), který rotuje a je vyhříván zvnějšku pomocí horkého plynu. Přestup tepla do materiálu tedy probíhá radiálně z vnitřní stěny pece. Jen pro informaci dodám, že průměr válce je 1 m a délka válce je 1,5 m. Přesup tepla je popsán pomocí již definovaných rovnic. Na obrázku 17 je schéma zařízení. Předpokládá se, že teplo tekoucí skrz stěnu je válce  $q_m$  je stejné jako na vnitřní stěně válce  $q_{m-v}$ . Celková tepelná bilance procesu je v rovnici (20). Počáteční tepelný tok  $Q_{in}$  se dělí na  $Q_{loss}$ ,  $Q_{out}$  a konečně  $Q_{g-m}$ . Vše je hezky vykresleno na schématu na obrázku 18. Na zařízení je také instalováno několik termočlánků pro sledování teplot [19].

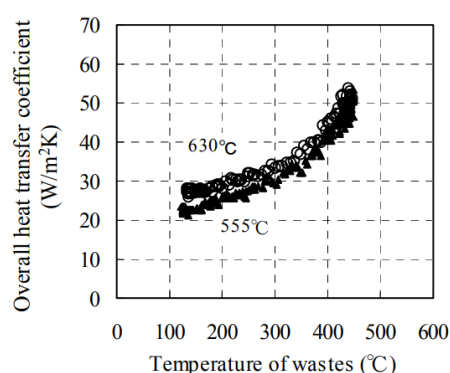
$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{loss} + Q_{g-m} \quad (20)$$



Obrázek 17: Schéma zařízení [19].

Během experimentu nastaly dva případy. Při teplotě ohřívacího plynu 800 °C byla střední teplota na povrchu vnitřní stěny válce 630 °C. Na druhé straně, pokud teplota

plynu byla pouze 700 °C, tak se střední teplota vnitřní stěny válce pohybovala na 555 °C. Na počátku procesu byl teplotní rozdíl mezi vnitřní stěnou válce a odpadem 520 °C (pro 630 °C), respektive 450 °C (pro 555 °C). Přičemž rozdíl teplot klesl na nulu až po 45 minutách od naplnění válce odpadem, a to jen v případě, kdy teplota vnitřní stěny válce byla 630 °C. V druhém případě byla určitá teplotní diference i po uplynutí 50 minut. Na posledním obrázku 18 je vidět, jak se mění součinitel přestupu tepla s měnící se teplotou odpadu. Jsou vykresleny dvě charakteristiky, a to pro oba případy teplot vnitřní stěny válce [19].



Obrázek 18: Koeficient přestupu tepla na teplotě [19].

Moraveji a Esmaeli (2012) se ve své publikaci věnují CFD modelování konvektivního přestupu tepla v trubce ohřívané konstantním tepelným tokem. Simulovali tok nanokapaliny  $H_2O-Al_2O_3$  a cílem bylo získat součinitel přestupu hmoty a informace o Nusseltově čísle. Experiment se odehrával v laminárním prostředí. V článku se například objevuje výpočet součinitele přestupu tepla  $\alpha_x$  v závislosti na poloze. S tím se pojí průměrná hodnota vypočítaná dle vztahu (21).

$$\alpha_{av} = \frac{1}{L} \int_0^L \alpha(x) dx \quad (21)$$

Z této hodnoty a pomocí známého vztahu, např. (18), lze vypočítat i průměrnou hodnotu Nusseltova čísla. Publikace je také založena na korelacích. Obecný předpis korelace pro získání  $Nu$  je v rovnici (22), kde  $C$  je konstanta,  $Re$  a  $Pr$  jsou známá bezrozměrná čísla a  $m$ ,  $n$  jsou mocniny.

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (22)$$

Jedna z běžně používaných korelací je například Dittus-Boelter korelace [21], viz rovnice (23). Druhá korelace zahrnuje i faktor koncentrace částic  $\varphi$  [20].

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (23)$$

$$Nu = 0,716 \cdot Re^{0,314} \cdot Pr^{0,6} \cdot \varphi^{0,3} \quad (24)$$

V publikaci od Chavan (1983) se lze dočíst o experimentu, při kterém byly testovány tři různá míchadla, konkrétně pásové, pásové-šroubové a šroubové. Sledovalo se míchání velmi viskózní kapaliny a také přestup tepla. Byla sestavena rovnice přestupu tepla, v mé práci pod číslem (25).

$$Nu = 0,808 \cdot Re^{1/3} \cdot Pr^{1/3} \quad (25)$$

## 2.5. Ohřev šneku Jouleovým teplem

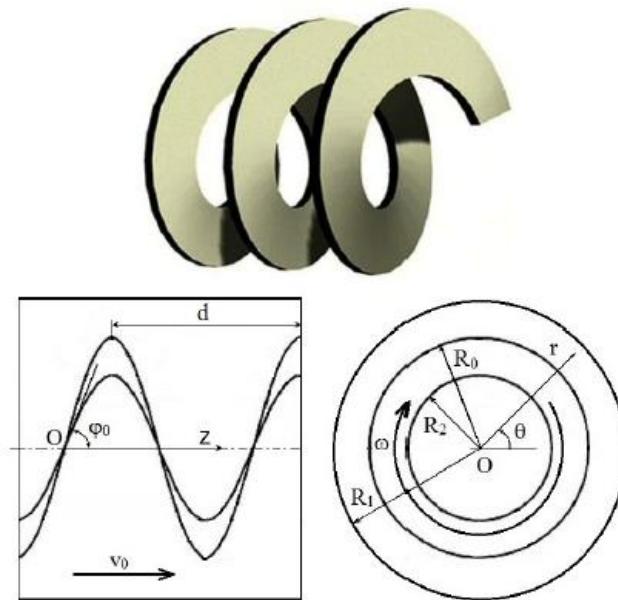
Jedním ze způsobů vyhřívání šneku, aby šnek sloužil jako zdroj tepla pro ohřev materiálu je Jouleovo teplo neboli odporové teplo. Dopravník lze označit jako zařízení elektrotepelné odporové. Elektrický ohřev je proces, kdy se elektrická energie mění na energii tepelnou. Vznikající Jouleovo teplo je popsáno Joule-Lenzovým zákonem, viz rovnice (26), kde  $R$  je odpor vodiče,  $I$  je okamžitá hodnota procházejícího [23]. Jednotkou  $\dot{Q}$  je Watt.

$$\dot{Q} = R \cdot I^2 \quad (26)$$

Dle vzniku a využití odporového tepla se užívají dva způsoby ohřevu, a to přímý odporový ohřev a nepřímý odporový ohřev. V případě přímého ohřevu prochází elektrický proud samotným zpracovávaným materiálem. Kdežto u nepřímé varianty prochází proud nějakým vodičem umístěným v zařízení. V mém případě se jedná o šnek [23].



Ledakowicz a Piddubniak (2021) se ve své publikaci zabývají ohřevem bezosého šneku a sdílením tepla v pyrolýzním šnekovém reaktoru. Na obrázku 19 je zachycen bezosý šnek s parametry a souřadnicemi. Při výpočtu autoři používají cylindrické souřadnice.



Obrázek 19: Bezosý šnek s parametry a souřadnicemi [24].

Při procesu se využívá zmíněného Joule-Lenzova zákona, respektive Jouleova tepla. Pomocí numerického výpočtu se autoři dostali k řešení rozložení teplotního pole v trubkovém kanále, který má izolovanou stěnu. Jedná se tedy o adiabatický reaktor. Jako příklad, jakým způsobem řeší tuto úlohu, připojuji rovnici (27), která vyjadřuje zdroj tepla pomocí několika funkcí.

$$q(r, \theta, z, \tau) = \frac{q_0 \varepsilon}{\varepsilon - \varepsilon_0} r [H(r - R_2) - H(r - R_0)] \sum_{-\infty}^{\infty} \delta [(\theta + 2\pi m + \omega \tau) r \cos \varphi_0 - z \sin \varphi_0] H(\tau) \quad (27)$$

Výraz  $H(x)$  představuje Heavisideovu funkci,  $\delta(x)$  je tzv. Diracova funkce. Veličina  $q_0$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je vysvětlena v rovnici (28), přičemž  $\rho_0$  [ $\Omega \cdot \text{m}$ ] je specifický elektrický odpor vodiče a  $j$  [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ] je elektrická proudová hustota vodiče. Dále se objevuje např. symbol  $\varepsilon$  reprezentující poměr  $R_0/R_1$  a  $\varepsilon_0$  vyjadřující poměr  $R_2/R_1$ .

$$q_0 = \rho_0 \cdot j^2 \quad (28)$$

Postup výpočtu poté vede přes integrální Fourierovu a Laplaceovu transformaci. Řešení nalezní použitím Fourier-Besselovy řady. Parametry, které zde mají roli jsou vlastnosti látky, rychlost proudění, rozměry šneku a trubky, stoupání šneku a otáčení šroubu. Teplota v trubkovém kanálu závisí na době působení zdroje tepla a na rozměrech trubky a šneku. Pokud chceme zachovat rozložení teplot, tak při zvětšování mezery mezi šnekem a trubkou je nutné Jouleovo teplo zvyšovat. Přímá úměra platí i obráceně.

Teplotní pole se utváří vlivem otáčení šneku, stoupání, průměry šneku a trubky a také tokem látky. Ohřívání vsádky není souměrné. Nesouměrnost je dána samotným šnekem. Teplota na vnitřní straně trubky má tedy oscilační charakter. Oscilace mají pilovitý tvar a perioda kmitů je určena úhlem otáčení šneku. Otáčení šneku má efekt takový, že s rostoucí rychlostí otáčení klesá teplota v daném bodě. Dále lze konstatovat, že při menším stoupání šroubu se lokální teplota zvětšuje [24].

Na rovnici (26) navazuje energetická bilance popsaná rovnicí (29). Teplo  $\dot{Q}_E$  představuje tepelný výkon dodaný skrze šnek. Teplo  $\dot{Q}_x$  vyjadřuje tok tepla mezi vstupem a výstupem dopravníku a poslední výraz je teplo předané šnekem do kapaliny. Rozdíl teplot  $\Delta T$  znamená rozdíl mezi střední kalorimetrickou teplotou  $T_x$  v místě  $x$  a vstupní teplotou  $T_{in}$ . Logaritmický teplotní rozdíl obsahuje teplotu na stěně šneku  $T_s$  a na stěně kanálu  $T_w$ .

$$\dot{Q} = \dot{Q}_E = \dot{Q}_x = \dot{Q}_r = R \cdot I^2 = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T = \alpha \cdot S \cdot \Delta T_{ln} \quad (29)$$

$$\Delta T = T_x - T_{in} \quad (30)$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{T_s - T_w}{\ln \frac{T_s}{T_w}} \quad (31)$$

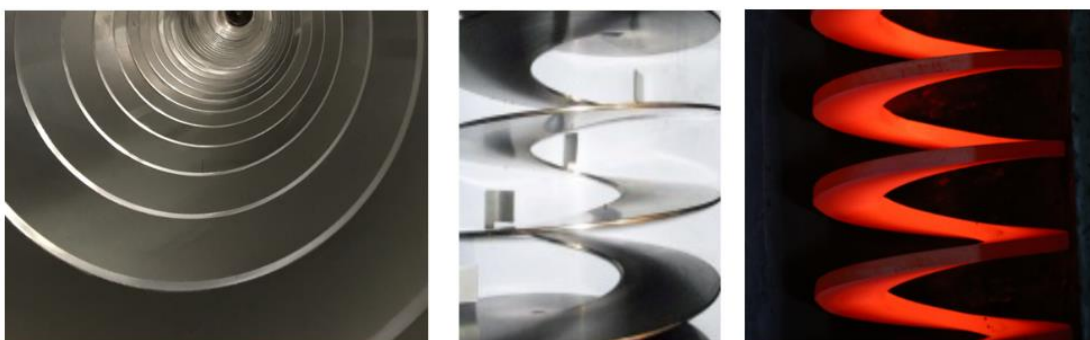
### 2.5.1. Elektricky vytápěný dopravník

Tato kapitole přímo navazuje na tu předchozí, jelikož jsem zde nastínil, jak může vypadat zařízení pracující s Jouleovým teplem je. Jedná se o elektricky vytápěný šnekový dopravník, který se nazývá Spirajoule. Jádrem tohoto zařízení je bezosý šnek ohříváný

elektricky neboli Jouleovým teplem. Na stěně šneku je nastavena konstantní hustota tepelného toku a lze vyvinout teplotu až 850 °C. Výhodou je, že není zapotřebí jiného vytápění, ani jiné speciální úpravy. Zpracovávaným materiálem mohou být odpady z potravinářství, chemického průmyslu, z petrochemie nebo ze zemědělství. Dále je možné využít Spirajoule například ke sterilizaci potravin. Na obrázku 20 je vidět jednotka Spirojoule. Na dalším obrázku 21 je již detail na bezosý šnek [25].



Obrázek 20: Elektricky vytápěný dopravník [25].

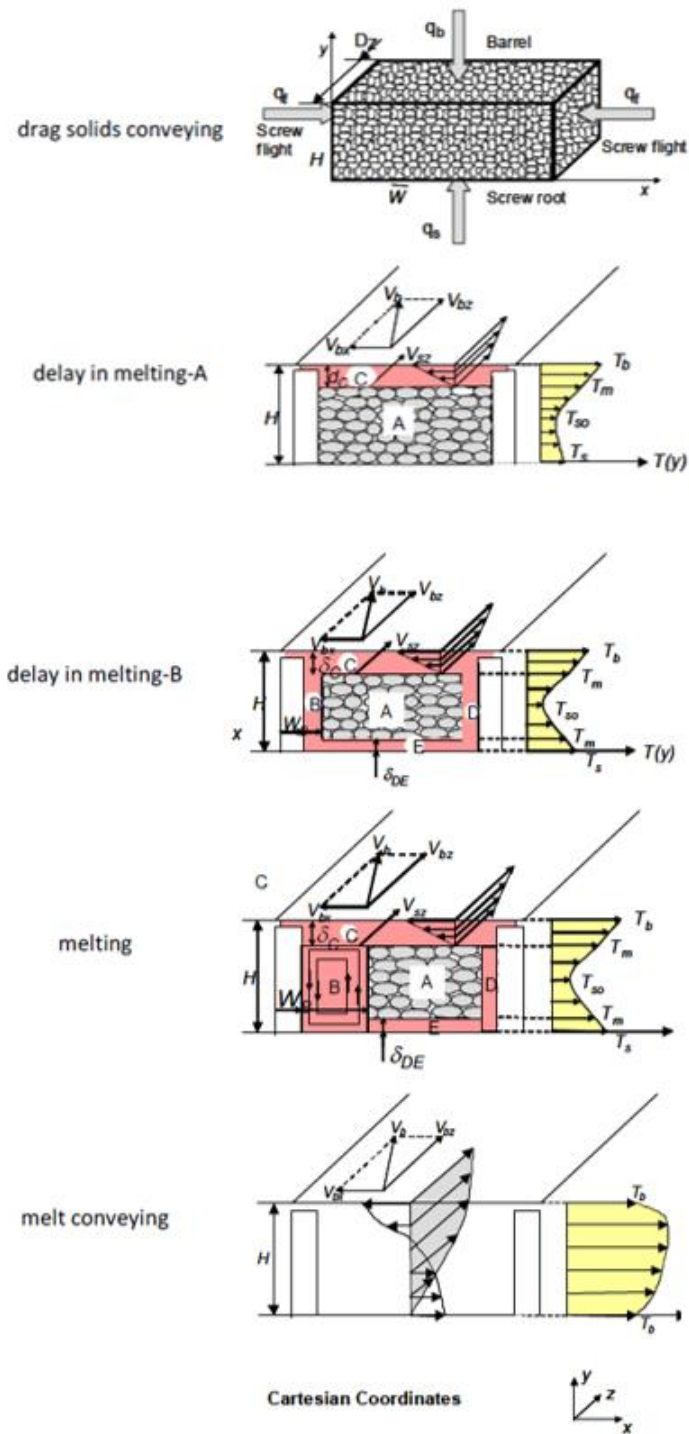


Obrázek 21: Detailní pohled na bezosý šnek [25].

## 2.6. Tavení materiálu

Doprava pevných látek je obvykle modelovaná za předpokladu tření neizotermické elastické pevné látky mezi dvěma rovnoběžnými deskami (komora a jádro šroubu) s různými koeficienty tření. Tepelný efekt plyne z nahřívání tavicí komory a z tření polymeru o kov. Efekt vede k roztavení pevného polymeru v blízkosti stěny válce (komory). Později se materiál natavuje také směrem od jádra šroubu. Vytváří se film. V důsledku relativního pohybu šroubu a válce roztavený materiál nemůže téct zpět mezerou mezi vnitřní stranou komory a závitů šroubu. Ve výpočtech bývá třecí síla nahrazena smykovým napětím. V první fázi lze získat tloušťku filmu a teplotu řešením rovnice hybnosti a energie.

Covas a Gaspar-Cunha (2018) popisují model tavení založený na experimentu uváděném v padesátých letech minulého století. Na Obrázku 22 je zobrazen proces tavení. Předpokládaly existenci hlavní tavné lázně (B), filmu (C), který odděluje pevnou část (A) od bočních a spodních stěn šroubu (D, E). Byla také uvažována konstantní rychlost pevného lože a recirkulace toku napříč kanálem. Tok a přenos tepla byly popsány různými formami hybnosti a energetickými rovnicemi, spojené s příslušnými okrajovými podmínkami. Vzhledem ke složitosti modelu se při výpočtech často uvažuje dvourozměrné neizotermní proudění nenewtonské tekutiny [26].

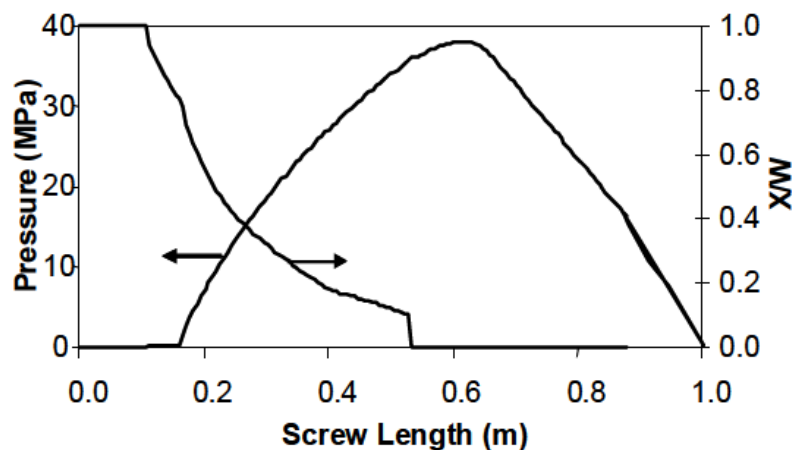


Obrázek 22: Fyzikální model pro funkční zóny vyvíjející se podél šroubového kanálu [26].

Během proudění se budou suspendované kapky postupně protahovat v důsledku smyku. V článku se objevuje korelace protažení  $L$ , která závisí na smykové deformaci  $\gamma$  a počátečním průměru  $d$ .

$$L = \begin{cases} \left(1 + \frac{\gamma^2}{2} + \frac{\gamma}{2}\sqrt{4 + \gamma^2}\right)^{0.5} \cdot d & \text{if } \gamma < 5 \\ \gamma \cdot d & \text{if } \gamma \geq 5 \end{cases} \quad (32)$$

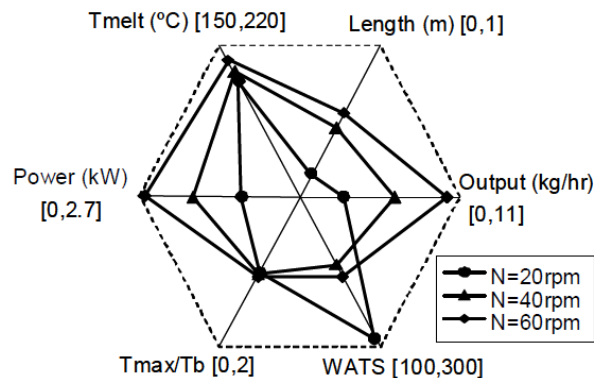
Velikost kapiček se zmenšuje erozí (zanedbatelný účinek) a rozpadem. K rozpadu dochází, když jsou viskózní síly vyšší než mezifázové napětí a když viskózní síly působí delší dobu. Výsledky experimentu jsou zobrazeny v diagramech na obrázcích 23 a 24. Na prvním obrázku, je ukázáno, jaký je průběh tlaku a podíl pevných částic v šířce mezi závitů v závislosti na délce šneku. Přibližně od poloviny délky šnek pracuje jen s taveninou.



Obrázek 23: Rozložení tlaku a relativní podíl pevných částic podél délky extrudéru [26].

Obrázek 24 zajímavým způsobem kombinuje 6 parametrů, jejichž hodnoty se mění s různým nastavením otáček ( $n = 20$  - kolečko,  $40$  - trojúhelník,  $60$  - čtvereček,  $\text{min}^{-1}$ ). Parametry jsou: průměrná teplota tavení  $T_{MELT}$ , délka šneku nutná pro natavení, hmotnostní tok na výstupu, stupeň distributivního míchání WATS, disipace (poměr maximální teploty tavení a teploty pláště  $T_{MAX}/T_B$ ) a příkon.

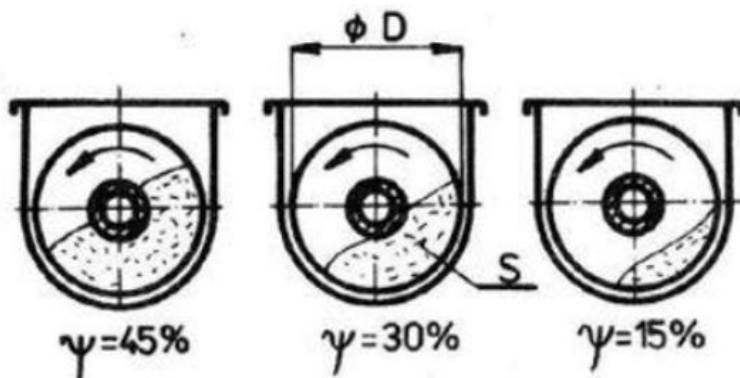
Výsledek je takový, že rostoucí otáčky znamenají vyšší průtok, ale zároveň také: vyšší spotřebu energie, disipaci a teplotu tavení, nižší účinnost míchání – obecně se zkracuje prostor pro tavení a míchání a tím i doba zdržení [26].



Obrázek 24: Diagram znázorňující proměnné: Výkon, teplotu taveniny, délku extruderu, hmot. tok na výstupu, WATS a poměr teplot v závislosti na rozdílných otáčkách [26].

## 2.7. Doprava materiálu

Součinitel plnění  $\psi$  je důležitý parametr, který výrazně ovlivňuje dopravní podmínky. Kanál je naplněn materiálem pouze z části. Obrázek 25 graficky znázorňuje 3 stavy plnění. Následující tabulka 1 je v mé práci pouze informativní, jelikož se zde nezabývám dopravou partikulárního materiálu. Považuji ji však za zajímavou, a to z hlediska vytvoření určité představy o tom, jak lze daný materiál dopravovat.



Obrázek 25: Grafické znázornění a součinitele plnění dopravníku [1].

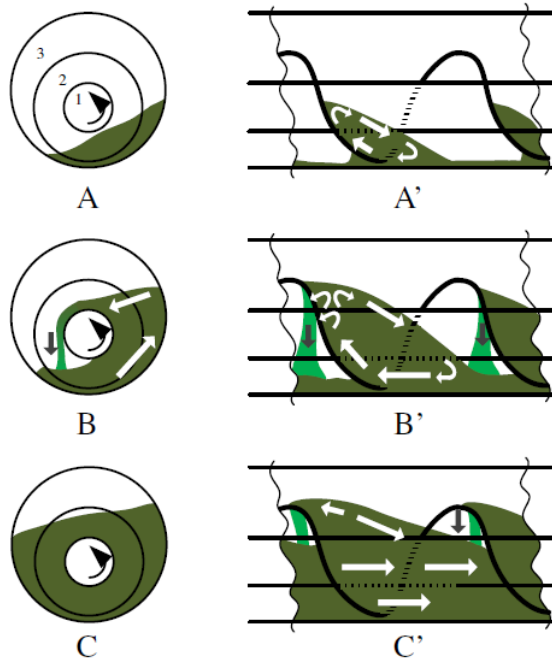
S obrázkem 25 se pojí rovnice (33) určující plochu průřezu materiálu ve žlabu. Kde  $\psi$  je již zmiňovaný součinitel plnění a  $D$  je průměr šnekovnice. Objem materiálu ve žlabu získám jednoduše vynásobením pravé části rovnice délkou dopravníku  $L$ .

$$S = \psi \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \tag{33}$$

<i>Vlastnosti materiálu</i>	<i>Příklad</i>	<i>Součinitel plnění <math>\psi</math> [-]</i>	<i>Otáčky <math>n</math> [1/s]</i>	<i>Rychlost <math>v</math> [m/s]</i>
neabrazivní, lehký práškovitý nebo zrnitý	uhelný prach, mouka, vápno	0,45	2 až 4	0,5
neabrazivní zrnitý a práškovitý abrazivní	uhlí, sůl, cement, písek	0,30	1 až 2	0,2 až 0,4
velmi abrazivní, hrubě kusovitý, lepivý	drobný koks, hrubozrnné vápno	0,15	0,2 až 1	0,1

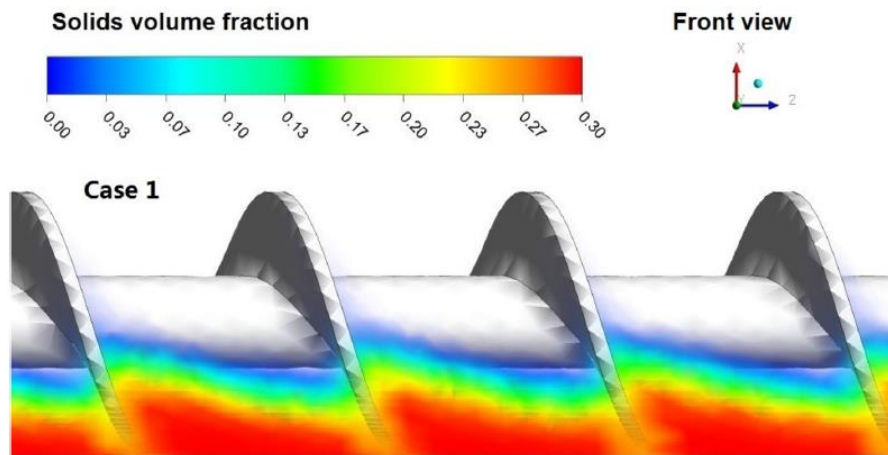
Tabulka 1: Podmínky dopravy sypkých materiálů [1].

Naplnění šnekové dopravníku ovlivňuje kroutící moment. Vazká kapalina vytváří odpor proti otáčení šneku. Čím viskóznější kapalina, tím větší odpor. Nízká hladina tedy zamezuje vysokému namáhání hřídele. Vysoký odpor je také nutné překonat velkou silou. A větší výkon znamená větší spotřebu elektrické energie. Na obrázcích 26 a 27 jsou příklady modelování částečně naplněných šnekových dopravníků [27] [28].



Obrázek 26: Tok materiálu během otáčení šneku při různém plnění. 1 - hřídel, 2 - šnek, 3 - žlab. A, B, C – přední pohled, A', B', C' - boční pohled [27].





Obrázek 27: CFD simulace vícefázového modelu Euler-Euler [3D Eulerian-Eulerian modeling of a screw reactor for biomass] [28].

### 2.7.1. Určení průtoku šnekovým dopravníkem

V této práci mám k dispozici rozměry dopravníku. Neznámý je pro mě průtok materiálu. Následující rovnice lze využít k prvotnímu nástřelu hmotnostního průtoku materiálu dopravníkem. Rovnice (34) slouží k výpočtu objemového průtoku materiálu  $\dot{V}$ , kde  $D$  je průměr šneku,  $s$  je stoupání šroubovice,  $n$  jsou otáčky šneku,  $\psi$  je součinitel plnění a  $c_H$  je součinitel sklonu dopravníku. Součinitel  $c_H$  je v případě horizontálního uspořádání roven jedné, takže jej lze zanedbat. Z rovnice (34) vychází vztah (35) na výpočet hmotnostního průtoku [29].

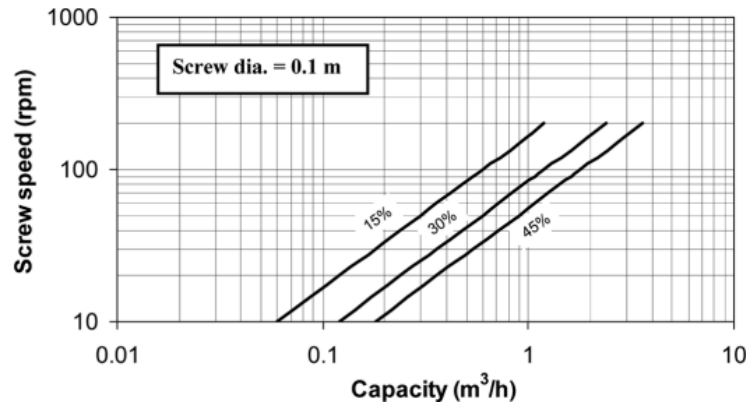
$$\dot{V} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot s \cdot n \cdot \psi \cdot c_H \quad (34)$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (35)$$

Takto vypočítaný hmotnostní tok dosazují jako okrajovou podmínku při výpočtu v ANSYS Fluent. Jak ale bude patrné v praktické části, nebudu počítat jen s touto hodnotou, ale na základě tlakové ztráty budu hledat další průtoky.

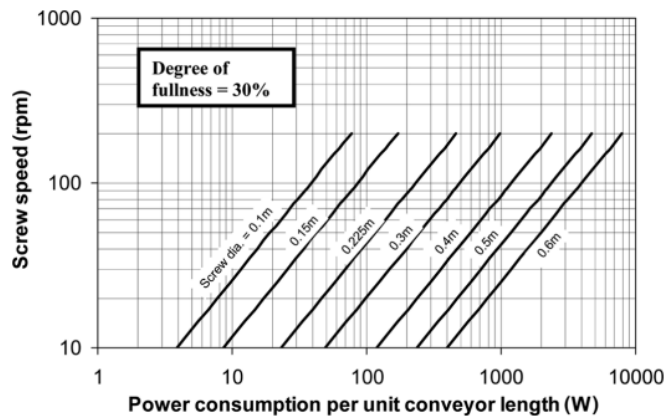
Článek od Waje a kol. (2006) popisuje šnekový dopravník jako sušárnu materiálů. Celá sestava je jeden velký výměník. Střed zařízení tvoří šnekový dopravník. Materiál vstupuje tradičně na začátku dopravníku vrchním víkem a vychází na konci spodem. Jedná se o dvoufázový tok pevné částice – plyn. Jako „pracovní“ plyn je použit dusík.

Kanál dopravníku je z vnější strany vytápěn horkou vodou. Sušení materiál a voda nepřicházejí do kontaktu. V článku mě zaujaly 2 grafy. První z nich, na obrázku 28 popisuje vztah objemového průtoku  $\dot{V}$  a otáček  $n$  pro tři koeficienty plnění. Platí při podmínkách experimentu ( $\rho = 550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $D = 0,1 \text{ m}$ ,  $s = D$ ,  $e = 0,006 \text{ m}$  a  $c = 0,002 \text{ m}$ )



Obrázek 28: Závislost objemového průtoku a otáček při různých koeficientech plnění [30].

Graf na obrázku 29 popisuje závislost příkonu a otáček pro různé průměry šneku a při koeficientu plnění  $\psi = 0,3$ . Opět platí při podmínkách experimentu ( $\rho = 550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\psi = 0,3$ ,  $s = D$ ,  $e = 0,006 \text{ m}$  a  $c = 0,002 \text{ m}$ )



Obrázek 29: Závislost příkonu a otáček pro různé průměry šneku a při koeficientu plnění [30].

## 2.8. Materiálová data

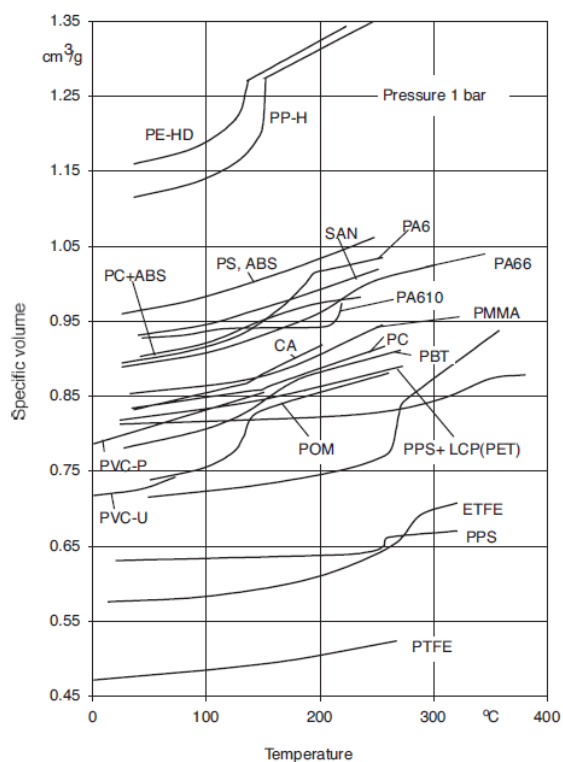
V této kapitole se zmiňuji o vlastnostech polypropylenu. Vlastnosti definované v této kapitole použiji pro výpočty v software ANSYS Fluent. Všechny níže definované hodnoty se v průběhu výpočtu nemění. Také je nutné napsat, že jsem čerpal z určitých

zdrojů a při porovnání s jinými publikacemi se „mé“ hodnoty mohou lišit. Při určování vlastností polymerů, ať už v pevném či kapalném skupenství, vždy záleží na postupu měření a vyhodnocení výsledků.

## 2.8.1. Polypropylen (PP)

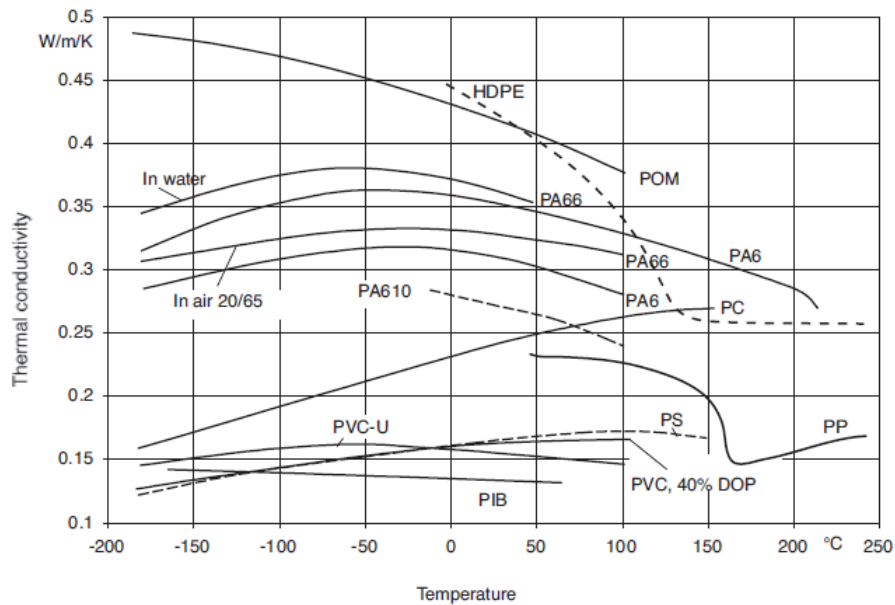
Jedná se o hojně používaný materiál. Mezi známé výrobky z PP například patří trubky, obaly, hračky, části karosérií, či lana. Vlastnosti, které pro výpočty potřebuji, jsou hustota  $\rho$ , součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , viskozita  $\mu$  ( $\eta$ ) a měrná tepelná kapacita  $C_p$ . Pro multifázový tok je ještě potřeba povrchové napětí mezi taveninou a plynem  $\sigma$ .

Začínám definicí hustoty. Na obrázku 30 jsou vykresleny závislosti specifického objemu  $v$  na teplotě pro různé materiály a je mezi nimi i polypropylen. Pro teplotu  $T = 200\text{ °C}$  odečítám hodnotu z grafu hodnotu specifického objemu a po převrácení této hodnoty získám hustotu polypropylenu  $\rho = 752\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  [31].



Obrázek 30: Specifický objem různých materiálů při tlaku  $p = 1\text{ bar}$  a závislosti na teplotě [31].

Pokračuji dále a hledám součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ . K tomu jsem opět našel graf na obrázku 31 vykreslující závislost na teplotě pro různé materiály. Z grafu odečítám velikost součinitele tepelné vodivosti  $\lambda = 0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .



Obrázek 31: Křivky polymerních materiálů zobrazující závislost tepelné vodivosti na teplotě [31].

Dalším parametrem je viskozita. S viskozitou je to trochu složitější, jelikož výrazně ovlivňuje hydrodynamické chování tekutiny. Pro výpočet zdánlivé viskozity  $\eta$  jsem použil reologický model Bird-Carreau. Tento model definuje zdánlivou viskozitu rovnicí (36).

$$\eta = \eta_0 \cdot [1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (36)$$

Veličina  $\eta_0$  představuje zdánlivou viskozitu při nulové smykové rychlosti,  $\lambda$  je časová konstanta modelu,  $n$  je index toku a  $\dot{\gamma}$  vyjadřuje rychlost smykové deformace. Smykovou rychlost si spočítám z (37), kde  $k$  je Metzner-Ottův koeficient pro rotační míchadla a  $n$  jsou otáčky šneku. Hodnoty koeficientů  $k$  jsou experimentálně stanovené pro různé typy míchadel. Mé úloze nejvíce odpovídá šroubové míchadlo v usměrňovacím válci. Pro tento případ je  $k = 16,8$  [29][32].

$$\dot{\gamma} = k \cdot n \quad (37)$$

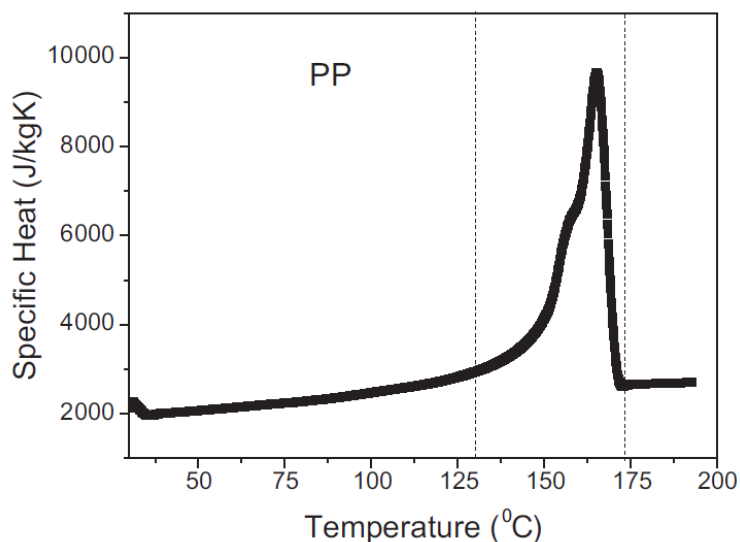
Nyní je nutné zjistit zdánlivou viskozitu při nulové smykové rychlosti a teplotě  $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . K tomu slouží Arrheniův model pro výpočet zdánlivé viskozity v rovnici (38). Viskozita se odvíjí od referenčních hodnot  $T_0$  a požadované teploty  $T$ , což je těch  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . V rovnici vystupuje zdánlivá viskozita  $\eta_0$  při nulové smykové rychlosti a referenční teplotě  $T_0$  a Arrheniův koeficient  $\alpha$ . Data k těmto konstantám a ke konstantám v rovnicích (37) a (38) jsou v tabulce 2.

$$\eta_0(T) = \eta_0(T_0) \exp \left[ \alpha \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (38)$$

<i>Parametr</i>	<i>Značka</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
Zdánlivá viskozita při nulové smykové rychlosti	$\eta_0(T_0)$	936,7	Pa·s
Referenční teplota	$T_0$	463	K
Časová konstanta modelu	$\lambda$	1,74	s
Arrheniův koeficient	$\alpha$	4330	K
Index toku	$n$	0,61	-
Metzner-Otto koeficient	$k$	16,8	-

Tabulka 2: Vlastnosti PP pro Arrheniův vztah [32].

Dalším údajem je měrná tepelná kapacita  $C_p$ . Její hodnotu pro  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  získám opět odečtením z grafu. Ten je na obrázku 32.



Obrázek 32: Měrná tepelná kapacita  $C_p$  pro polypropylen [33].

A konečně povrchové napětí  $\sigma$  pro polypropylen získám z [6].

## 2.9. Software ANSYS Fluent

Software ANSYS Fluent nabízí velké množství výpočetních metod. Některé lze aplikovat pouze na časově ustálený stav, některé naopak jen na časově proměnné chování, ale existují i takové, které mohou být využity v obou stavech. Pak většinou záleží na časové náročnosti výpočtu, respektive na časových možnostech uživatele, ale také na přesnosti požadovaných výsledků.

V mé práci se zabývám přenosem tepla a počítám dva případy. Nejprve se analyzuji plný šnekový dopravník a poté řeším šnekový dopravník s určitým stupněm plnění. V prvním případě lze řešit ustálený stav a využít metodu MRF, zatímco u druhého případu je lepší, ne však nutné, uvažovat nestacionární režim, a tedy metodu Sliding Mesh a vícefázovou metodu VOF.

### 2.9.1. Metoda MRF (Multiple reference frame)

Metoda je stacionární a je založena na kontaktu dvou zón, z nichž jedna se pohybuje a druhá je statická. Pohybující se oblast je v blízkosti nějakého pohyblivého (rotujícího, posuvného) členu, v mém případě je to rotující šnek. Na rozhraní dvou zón se provádí transformace lokálního referenčního rámce. To umožňuje použít tokové proměnné v jedné zóně k výpočtu toků na hranici sousední zóny. Metoda nezohledňuje relativní pohyb pohyblivé zóny vzhledem k sousední zóně, a síť tedy zůstává pro výpočet pevná. Někdy se metoda MRF označuje jako metoda se zmrazeným rotorem [34].

### 2.9.2. Metoda Sliding Mesh

Metoda Sliding Mesh počítá nestacionární proudění a síť se zde pohybuje. Na rozhraní dochází k přepočítávání jednotlivých výpočtových veličin. Řešení bývá často periodické, což znamená, že se s určitou periodou opakuje. Tato metoda je přesnější, ale nevýhodou je její časová náročnost [35].

### 2.9.3. Metoda VOF

Metoda VOF (Volume of Fluid) dokáže modelovat dvě nebo více nemísitelných tekutin řešením jediné sady rovnic hybnosti a sledováním objemového podílu každé z tekutin. Ve většině případů je nutné počítat nestacionární stav. Ustálené proudění je možné v případě, že je řešení nezávislé na počátečních podmínkách. Typické použití této metody je simulace toku kapaliny v otevřeném kanálu, pohybu velkých bublin v kapalině. Obecně lze říct, že VOF sleduje jakékoliv rozhraní mezi kapalinou a plynem. U této metody se předpokládá, že jednotlivé fáze mezi sebou neprostupují. Každá fáze  $q^{th}$  má svůj objemový podíl  $\alpha_q$ . V dané buňce, potažmo oblasti, se může objevovat čistě jedna složka, nebo mix více složek [36].

- pokud  $\alpha_q = 0$ , pak to znamená, že se fáze  $q^{th}$  v této oblasti nenachází
- pokud  $\alpha_q = 1$ , pak to znamená, že se v oblasti nachází pouze fáze  $q^{th}$
- pokud  $0 < \alpha_q < 1$ , pak se v oblasti nachází více fází

## 3. Modelování – praktická část

---

Po úvodní části a literární rešerši se nyní dostávám k vlastní praktické části, ve které představuji model šnekového zařízení použitý k numerickým výpočtům. Součástí této kapitoly je popis modelu, nastavení výpočtu a podmínek, za kterých jsou výpočty prováděny. Nakonec samozřejmě shrnuji výsledky a závěr pramenící ze simulací v softwaru ANSYS Fluent.

Cílem práce je vytvořit funkční model šnekového zařízení, které dopravuje viskózní kapalinu. Při dopravě dochází k ohřevu kapaliny pomocí elektricky ohřívaného bezosého šneku. Na povrchu šneku je nastavena konstantní hustota tepelného toku. Na základě této podmínky se podél souřadnice  $z$  mění teplota na povrchu šneku. Dále se mění střední kalorimetrická teplota kapaliny a mění se i součinitel přestupu tepla  $\alpha$ , který je jedním z vyhodnocovaných parametrů. V diplomové práci řeším šnek, který je zcela zaplněn a šnek s určitým plněním  $\psi$ , a tedy volnou hladinou. Během práce jsem provedl mnoho výpočtů. Jak jsem popisoval v rešerši v kapitole 2.8., počítám s hodnotami, které odpovídají tavenině polypropylenu při teplotě  $T = 200$  °C. V případě plného šneku jsem simuloval taveninu se dvěma různými viskozitami, nastavil jsem 3 různé otáčky šneku a 5 hmotnostních průtoků. Tato část tedy obsahuje celkem 30 simulací. V případě částečně zaplněného šneku jsem sestavil model a pokusil se o simulaci vícefázového toku.

### 3.1. Geometrie šnekového zařízení

V úvodní části diplomové práce byla shrnuta různá provedení šnekových zařízení. I díky těmto informacím byl navržen dopravník s bezosým šnekem ohraničený válcovým tepelně izolovaným kanálem. Rozměry šneku a válce jsou v následující tabulce 3. Značení a následně i kótování jsem prováděl v souladu s obrázkem 6.

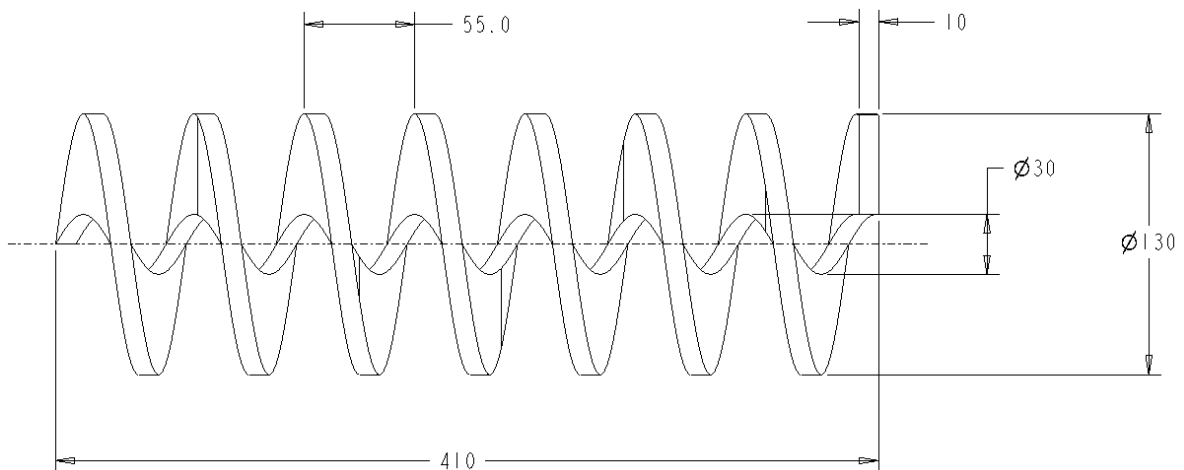


<i>Parametr</i>	<i>Značka</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
Průměr kanálu	$Dt$	0.132	m
Průměr šneku	$D$	0.130	m
Průměr jádra (hřídele)	$d$	0.030	m
Stoupání šroubovice	$s$	0.055	m
Tloušťka listu	$e$	0.010	m
Úhel stoupání	$\phi_t$	0.132	rad
Obvodová šíře	$W$	0.045	m
Vůle mezi šroubem a válcem	$c$	0.001	m
Délka šneku	$l$	0.410	m

Tabulka 3: Rozměry šnekového dopravníku.

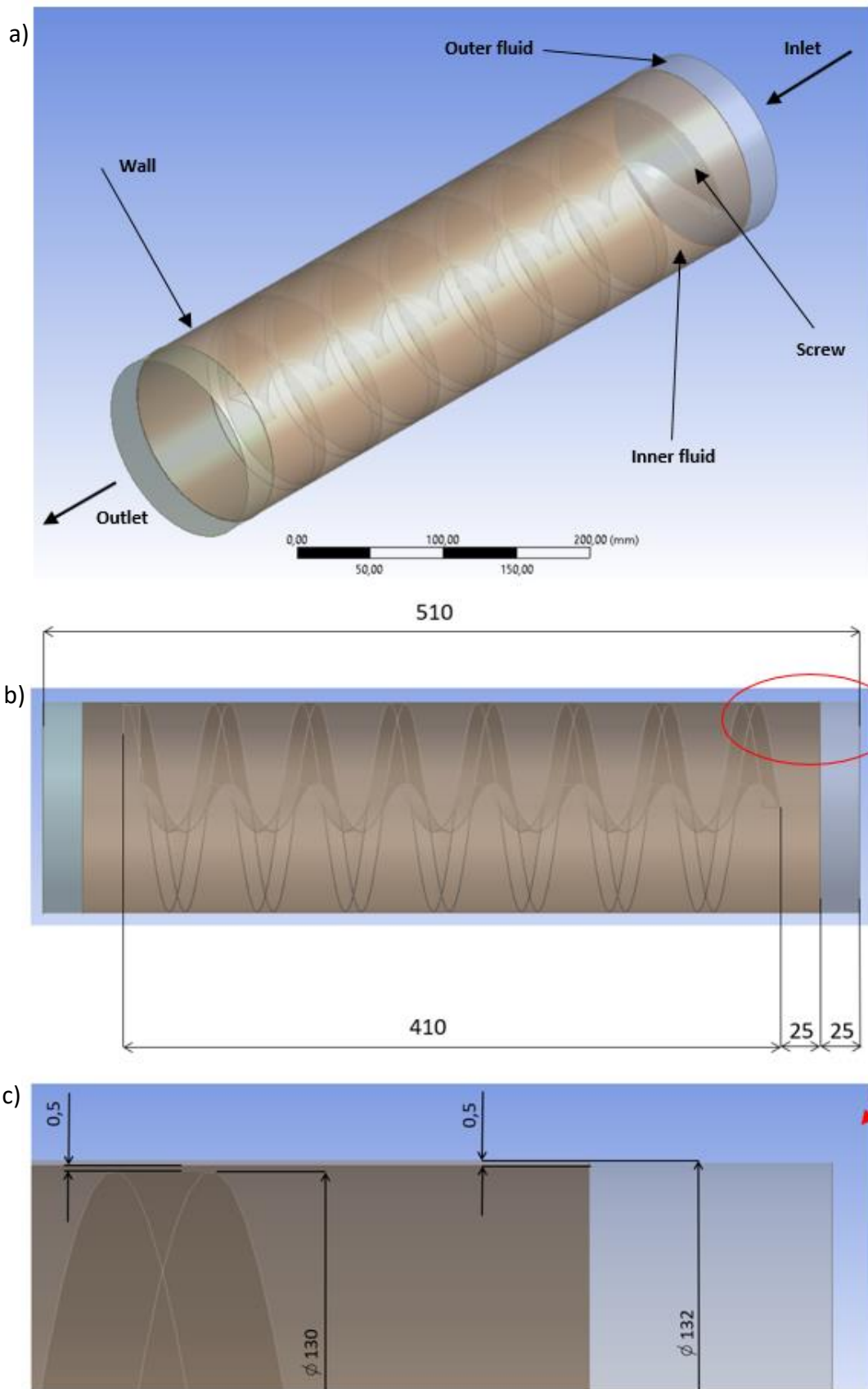
ANSYS software je se svými pracovními aplikacemi velice robustní výpočetní nástroj. Centrálním prostředím je Workbench, který ze svého menu nabízí spuštění všech aplikací a také tyto aplikace dokáže přehledně propojovat.

Na začátku simulací je vždy geometrie. Výhodou ANSYSu je možnost vybrat modelář pro tvorbu 3D či 2D geometrie. Přímo ve Workbench je k dispozici buď Design Modeler anebo Spaceclaim. Třetí možnost pro tvorbu geometrie je využití nějakého CAD software a následně geometrii importovat do ANSYSu, respektive do Workbench. Já se rozhodl pracovat v Design Modeleru. Na obrázku 33 je kótovaná skica šnekovnice. Všechny rozměry již byly předloženy v tabulce 3.



Obrázek 33: Kótovaná skica šnekovnice.

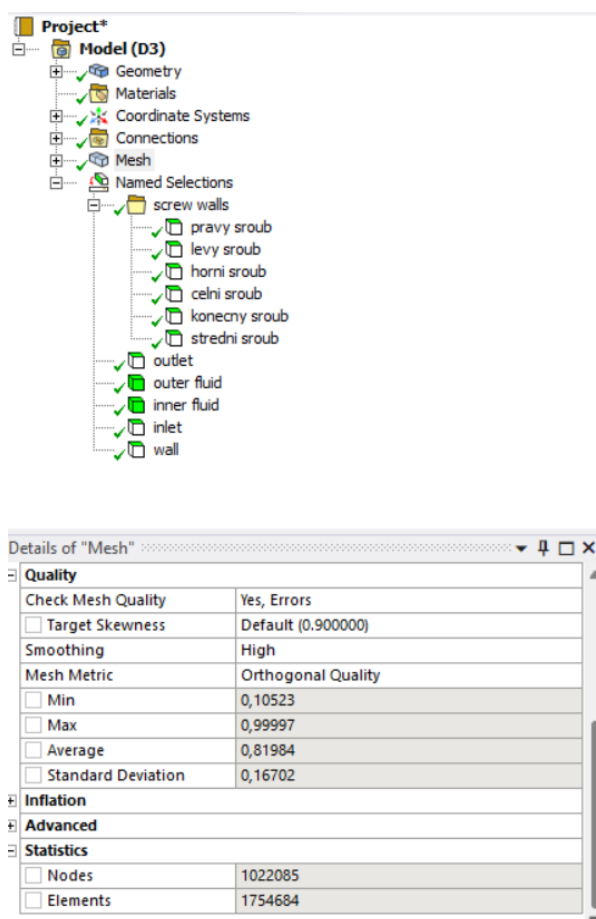
Šnek jsem vymodeloval rotováním obdélníku o stranách 50x10 mm kolem osy pomocí funkce Sweep. Vzdálenost spodní hrany obdélníku je 15 mm od středové osy. V dalším kroku jsem vytvořil plný válcový kanál o průměru  $D_t = 0,132$  mm. Mezi šnekem a kanálem vznikla mezera  $c = 1$  mm. Kanál má délku 510 mm s tím, že šnek je od začátku a konce kanálu vzdálen 50 mm. Dále jsem pomocí funkce Boolean „vyjmul“ těleso šneku z kanálu a tím vznikla vnitřní oblast reprezentující stěny šneku. To je důležitý bod k tomu, abych byl schopný vytvořit tzv. rotující a statickou část kapaliny a mohl použít metodu MRF při časově ustáleném stavu, případně Sliding mesh při nestacionární úloze. Nakonec jsem pomocí funkce Slice rozdělil sestavu na jednotlivé úseky, které jsem pak spojil do jednoho dílu. Tato operace by měla napomoci k vytvoření lepší sítě. Obrázek 34a) představuje výsledný 3D model, na obrázku 34b) jsou zobrazeny propozice šneku a kanálu. Obrázek 34c) zachycuje detail umožňující lépe ukázat mezeru mezi válcem a šnekem a mezi jednotlivými rámci. Model je umístěný vodorovně a vstup i výstup jsou v ose z.



Obrázek 34: a) model dopravníku s popisky, b) propozice modelu, c) detail rotační a statické zóny.

## 3.2. Síťování

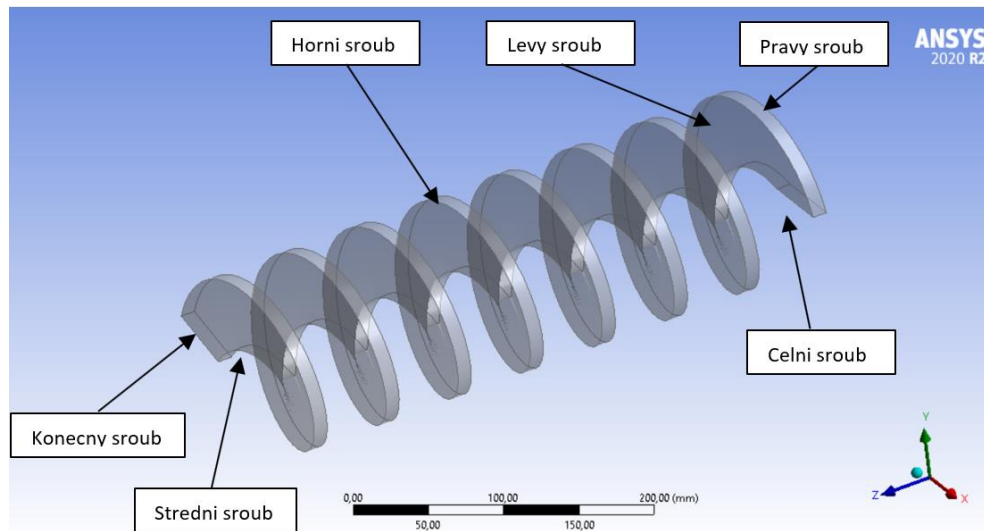
Jedná se o úlohu, ve které se nachází velmi malé a úzké plochy, a to mezi šnekem a stěnou kanálu. Tyto plochy mohou dělat při prvotním generování sítě problémy. Z toho důvodu jsem upravil několik parametrů, abych získal kvalitnější síť. Na obrázku 35 lze vidět parametr Orthogonal Quality, jeden z důležitých parametrů určující kvalitu sítě. V tuto chvíli jsem se nacházel na spodním limitu. Pokud by Orthogonal Quality byla pod hodnotou 0,1, tak by stálo za zvážení další upravení sítě. Počet elementů je poměrně vysoký, konkrétně 1 754 684. Tato skutečnost je nepříjemná kvůli času potřebnému k provedení výpočtů. Vždy platí, čím více elementů, tím větší výpočetní nároky. Rychlost je samozřejmě také ovlivněna výkonem výpočetního zařízení, na kterém jsou simulace spuštěny.



Obrázek 35: Kvalita sítě, počet elementů a názvy ploch.

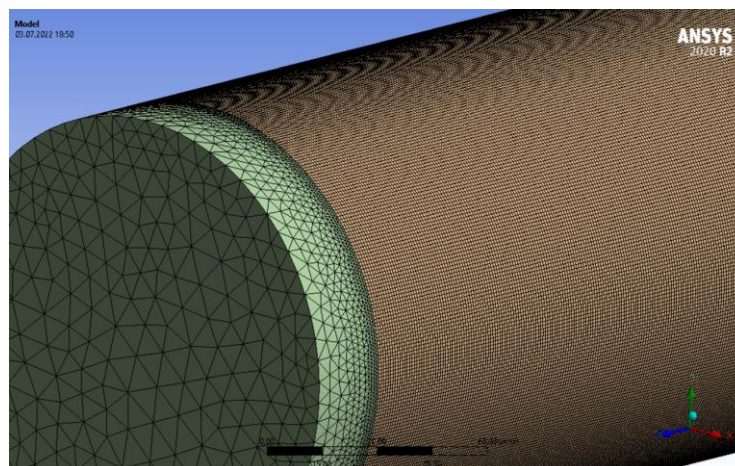
Na obrázku 35 jsou také zachyceny názvy jednotlivých ploch a objemů. Většinu jsem již popsal výše, ale nyní chci zmínit rozdělení šneku na jednotlivé plochy. Popis je na

obrázku 36. Je to spíš takový experiment, jelikož simulace jsem standardně prováděl s jedinou plochou pro šnek. Tato se nazývá Screw. Detaily experimentu popíši při vyhodnocování výsledků.



Obrázek 36: Pojmenování jednotlivých ploch šneku.

Na obrázku 37 je vidět výsledná podoba sítě na vnějším povrchu. Důležité je napojení jednotlivých elementů mezi sebou.



Obrázek 37: Výsledná podoba sítě na vnější straně.

### 3.3. Simulace plného šneku

První úlohou, kterou jsem se zabýval je plný šnekový dopravník. Dopravovanou a ohřívanou kapalinou byla tavenina polypropylenu se dvěma různými viskozitami. Pro každou hodnotu viskozity jsem počítal 3 různé velikosti otáček a pro každou hodnotu otáček jsem nastavoval 5 hmotnostních průtoků. Celkem je tedy 30 simulací.

Nejprve jsem začal simulovat tok polypropylenu s viskozitou  $\eta_1 = 530,2$  Pa·s. Jelikož nebyl znám přesný hmotnostní tok kapaliny, tak jsem z rovnice (34), respektive (35), vypočítal teoretický průtok  $\dot{m}$  při daných podmínkách. Ten odpovídá hodnotě při měření 1. Následně jsem vypočítal polovinu, čtvrtinu a osminu původního průtoku. Zjistil jsem tlakové ztráty  $\Delta p$ . Poté jsem tyto tlakové ztráty vynesl do grafu, a nakonec našel průtok, při kterém je tlaková ztráta maximálně v řádu desítek Pa. Vždy to vychází způsobem, že měření 1 a 2 vychází s přetlakem na vstupu, měření 3 má přibližně nulovou tlakovou ztrátu a měření 4 a 5 má zápornou tlakovou ztrátu.

#### 3.3.1. Nastavení Fluentu

Po zkontrolování vstupního modelu jsem použil funkci Make Polyhedra. Tato funkce vytváří šestiúhelníkové elementy sítě, sníží počet elementů a zároveň zvýší kvalitu sítě. Upravená síť obsahovala 949 031 elementů a Orthogonal quality se pohybovala okolo hodnoty 0,2. Při simulování proudění plného šneku jsem se rozhodl používat časově nezávislý režim, a tedy i metodu MRF. Také jsem zadal gravitační zrychlení  $g = -9,81$  m·s<sup>-2</sup> do osy  $y$ , i když to v tomto případě nemělo mít vliv na výsledek. Významnou roli to naopak má při multifázovém toku, kde proudí plyn a kapalina. Software by při zanedbání gravitačního zrychlení mohl být „zmatený“ a nepočítat správně rozhraní kapalina-plyn.

##### *a) Model*

Jelikož hraje zásadní roli tepelný tok, je nutné zapnout výpočet Energie. Dále jsem zvolil laminární režim proudění. Disipace mechanické energie není brána v potaz. Hodnota hustoty tepelného toku  $q$  je tak vysoká, že disipace nehraje významnou roli.

## b) Materiál

Nastavení materiálu je dalším významným krokem. Jedinou tekutinou je zde tavenina. První sadu měření jsem prováděl s taveninou polypropylenu o viskozitě  $\eta_1 = 530,2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , druhou sadu poté s taveninou polypropylenu o viskozitě  $\eta_2 = 363,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . V tabulce 4 jsou vypsané hlavní vlastnosti taveniny při teplotě  $T = 473,15 \text{ K} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nelze opomenout ani vlastnosti šneku a kanálu. Materiálem byla zvolena ocel s vlastnostmi v tabulce 5.

Vlastnost	Značka	Hodnota	Jednotka
Hustota	$\rho$	752,6	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Viskozita 1	$\eta_1$	530,2	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
Viskozita 2	$\eta_2$	363,5	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
Tepelná kapacita	$C_p$	3 000	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost	$\lambda$	0,15	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Povrchové napětí	$\sigma$	0,03	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$

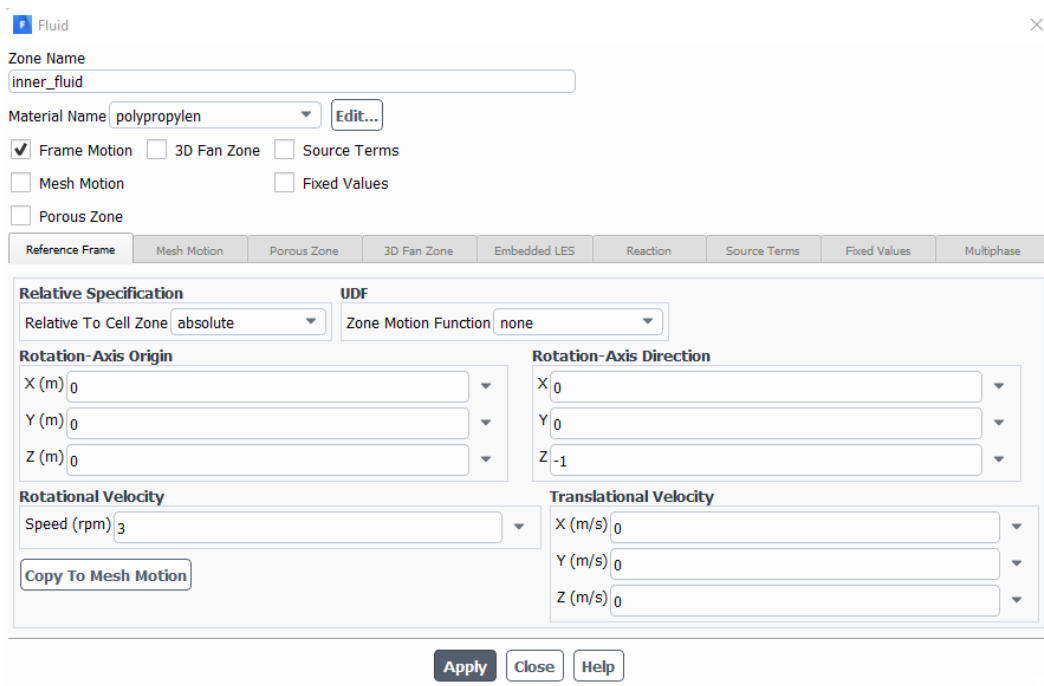
Tabulka 4: Vlastnosti taveniny polypropylenu při  $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Vlastnost	Značka	Hodnota	Jednotka
Hustota	$\rho$	8 030	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Tepelná kapacita	$C_p$	502,48	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost	$\lambda$	16,27	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Tabulka 5: Vlastnosti ocelového šneku a kanálu.

## c) Cell Zone podmínka

V dalším kroku jsem nastavil podmínky pro „vnitřní a vnější tekutinu“, kterou jsem ve své práci nazval inner fluid a outer fluid. Na obrázku 38 je ono okno s nastavením. Jak je vidět, nyní je v sekci Material Name uveden polypropylen. Při výpočtu vícefázového toku VOF bude v této kolonce uvedeno Mixture, jelikož se bude jednat o dvě tekutiny, a to taveninu a plyn.



Obrázek 38: Nastavení "vnitřní tekutiny".

Pro doplnění, osa rotace je zvolena -z, a to na základě pravidla pravé ruky a otáčení šneku. Vnější kapalina, která je statická, speciálních nastavení podmínek nevyžaduje.

#### d) Okrajové podmínky

Na vstupu do dopravníku byla nastavena podmínka Mass flow inlet. Na výstupu bylo dáno Pressure outlet. Jak jsem již zmiňoval, hmotnostní průtok  $\dot{m}$  jsem počítal z rovnic (34) a (35). Ukázkový výpočet je v rovnici 35. Následně jsem vždy počítal polovinu, čtvrtinu a osminu. Stěna dopravníku a plochy šneku měly nastavenou podmínku Wall. Konkrétní nastavení okrajových podmínek je shrnuto v tabulce 6. Pro šnek byla v detailním nastavení vybrána pohybující se rotační stěna s absolutní velikostí otáček 3 RPM. Okrajové podmínky pro ostatní měření se lišily hmotnostním tokem a otáčkami.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot s \cdot n \cdot \psi \cdot c_H \cdot \rho = \frac{\pi}{4} \cdot 0,13^2 \cdot 0,055 \cdot \frac{3}{60} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 752,6 = 0,0275 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (35)$$

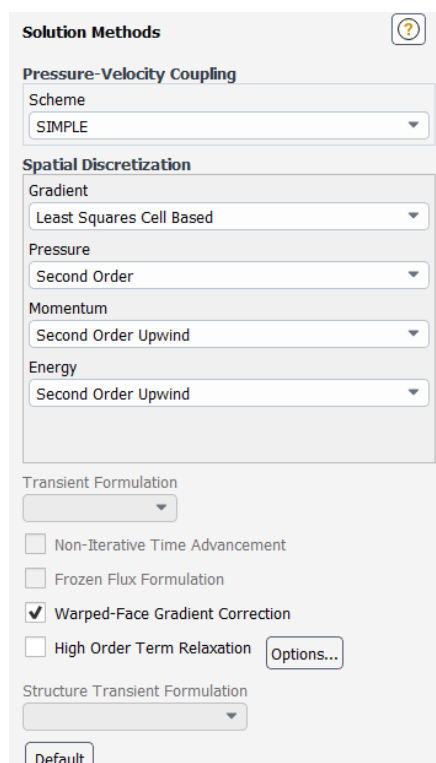


Oblast	Typ podmínky	Hmotnostní tok	Otáčky	Hustota t. toku	Teplota
		[kg·s <sup>-1</sup> ]	[1·min <sup>-1</sup> ]	[W·m <sup>2</sup> K <sup>-1</sup> ]	[K]
Inlet	Mass flow inlet	0.0275	-	-	473.15
Outlet	Pressure outlet	-	-	-	-
Screw	Wall	-	3	13 333	-
Wall	Wall	-	-	0	-

Tabulka 6: Okrajové podmínky pro taveninu při otáčkách n = 3 RPM a měření číslo 1.

### e) Výpočetní metoda a spuštění výpočtu

Obrázek 39 zachycuje nastavení výpočetních metod. Posledním krokem je inicializace. Zvolil jsem hybridní inicializaci. Tato varianta byla preferovaná, jelikož řeší řadu iterací (standardně 10) systému zjednodušených rovnic a obvykle lépe odhadne průtokové veličiny a urychluje celkový výpočet. Pak následovala kontrola nastavených podmínek pomocí tlačítka Check Case a samotné spuštění výpočtu pro zvolený počet iterací. Počáteční volba byla 2 000 iterací. Řešení konvergovalo, ale přesto jsem poté navýšil počet iterací na 5 000, abych se ujistil, že nenastane výkmit.

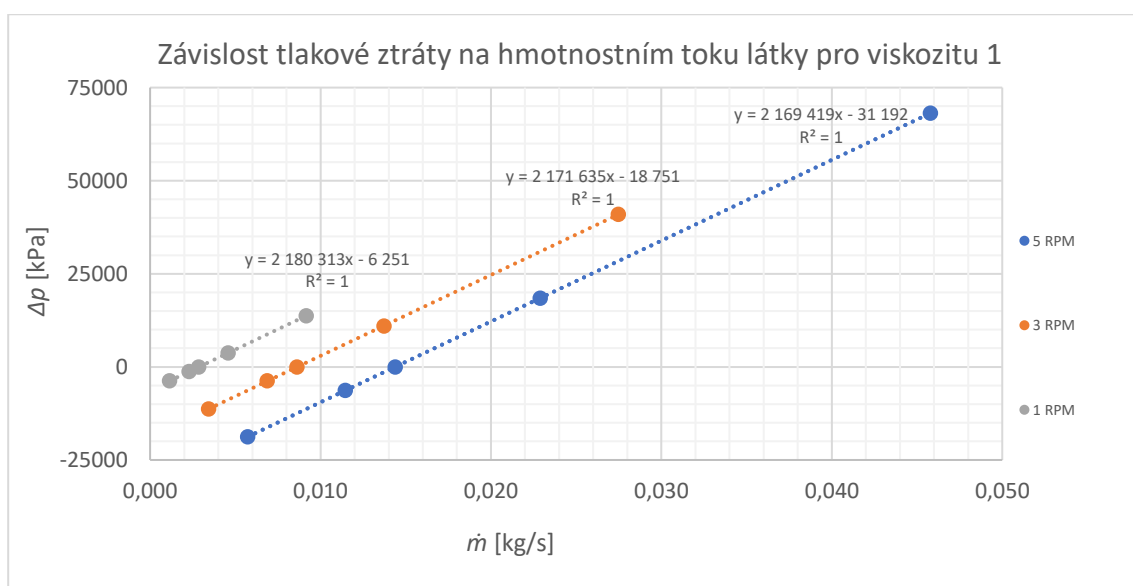


Obrázek 39: Výpočetní metody.

### 3.4. Vyhodnocení viskozity 1

V této části uvádím výsledky výpočtu plného šneku pro viskozitu polypropylenu  $\eta_1 = 530 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Porovnávám zde výsledky pro jednotlivé varianty, tzn. kombinace měnících se otáček, průtoků a s tím spojené změny tlakových ztrát, kroutících momentů, průběhů teplot a součinitelů přestupu tepla na stěně šneku.

Nejprve analyzuji tlakové ztráty  $\Delta p$ . Na obrázku 40 je graf, do kde jsou zaznamenané výsledky tlakových ztrát. Při přetlaku, kdy tlak na vstupu je větší než tlak na výstupu, dochází k protlačování kapaliny skrze šnek. Šnek tedy nebude stíhat pobírat přítok kapaliny při zvolených otáčkách, respektive tlak kapaliny bude šnek „pohánět“. V těchto případech je zvolený hmotnostní tok příliš velký a jedná se o první dva průtoky. Nejprve pro vypočítaný průtok z rovnice 35 a také pro jeho poloviční hodnotu. U čtvrtinové a osminové hodnoty průtoku vycházejí tlakové ztráty záporně. Pomocí rovnice přímky jsem poté získal „ideální průtok“.



Obrázek 40: Tlaková ztráta při různých průtocích a otáčkách  $n = 1, 3$  a  $5 \text{ RPM}$  pro viskozitu 1.

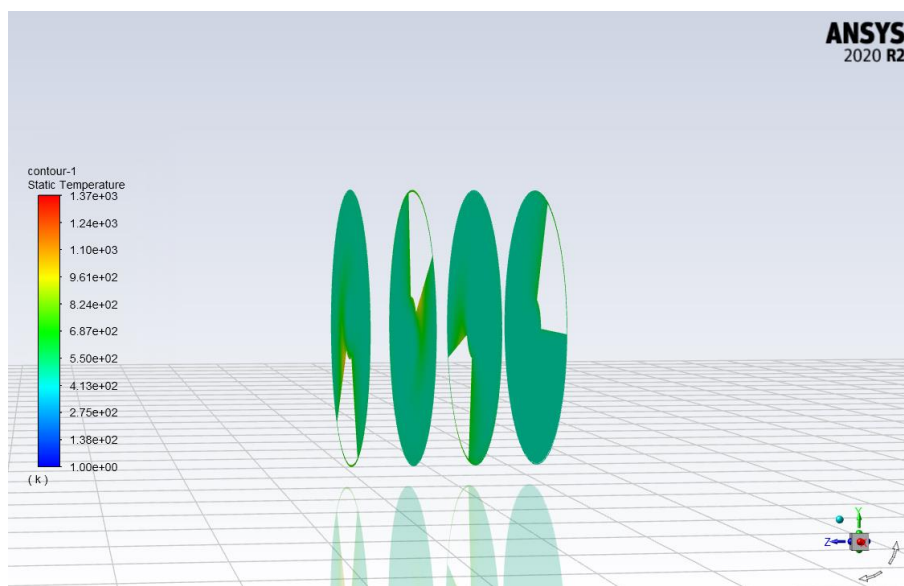
Při otáčkách  $n = 1 \text{ RPM}$  jsou nejmenší rozdíly v tlakových diferencích. V případě hledání nulové hodnoty  $\Delta p$  jsem se dostal k nejmenší hodnotě, konkrétně  $\Delta p = -1 \text{ Pa}$ , při pěti otáčkách za minutu. Naopak při otáčkách  $n = 1 \text{ RPM}$  jsem docílil nejnižší tlakové ztráty  $\Delta p = -34 \text{ Pa}$ . Docílit nulové hodnoty je určitě možné, ale vzhledem k časové náročnosti

jsem již více nezpřesňoval. I tak je dle mého názoru tlaková ztráta v řádu desítek Pa dostačující.

Dále jsem počítal příkon. Z kroutícího momentu, získaného z Fluentu, jsem vypočítal příkon na základě rovnice (39). Uvádím zde vzorový výpočet pro otáčky  $n = 3$  RPM a hmotnostní tok  $\dot{m} = 0,0275 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

$$P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{3}{60} \cdot 30,957 = 9,725 \text{ W} \quad (39)$$

Pokračoval jsem vyhodnocováním střední kalorimetrické teploty kapaliny a střední teploty na povrchu šneku podél osy  $z$ . Po dopočítání úlohy jsem rozdělil oblast se šnekem, tedy vzdálenost  $l = 0,41 \text{ m}$ , na 42 řezů po 10 mm. Jedná se o plochy v rovině  $xy$ , které jsou kolmé na osu  $z$ . Pro ukázkou přikládám obrázek 41 se čtyřmi takovými řezy. Vyplněné barevné oblasti znázorňují kapalinu a výřezy reprezentují plochy šneku.



Obrázek 41: Ukázka řezů v rovině  $xy$ .

Následně jsem zjistil střední kalorimetrickou teplotu kapaliny v každém řezu. Ve Fluentu na to existuje funkce *Surface Integrals*, kde jsem po zvolení *Mass Weighted Average* na vybrané ploše získal požadovanou střední kalorimetrickou teplotu. Tyto teploty jsem si uložil do textového souboru a následně sloužily k bilančním výpočtům.

V tabulce 7 se nachází seznam textových souborů a matlabovských výpočtů.

Pro snazší orientaci dodávám vysvětlení:

P1-1RPM-1-SCT / P1-1RPM-1-CT / P1-1RPM-1

- P1 – polypropylen o viskozitě  $\eta_1 = 530,2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$
- 1RPM – otáčky šneku  $n = 1 \text{ RPM}$
- 1 – měření číslo 1 (pro průtok  $\dot{m} = 0,0092 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- SCT – teplota na stěně šneku (screw temperature)
- CT – střední kalorimetrická teplota (calorimetric temperature)

V tabulce sice uveden není, ale pro výpočet je ještě důležitý textový soubor nazvaný plocha-sroubovice.txt. Tento soubor je pro všechny výpočty stejný a říká, jak se mění plocha šroubovice podél souřadnice z.

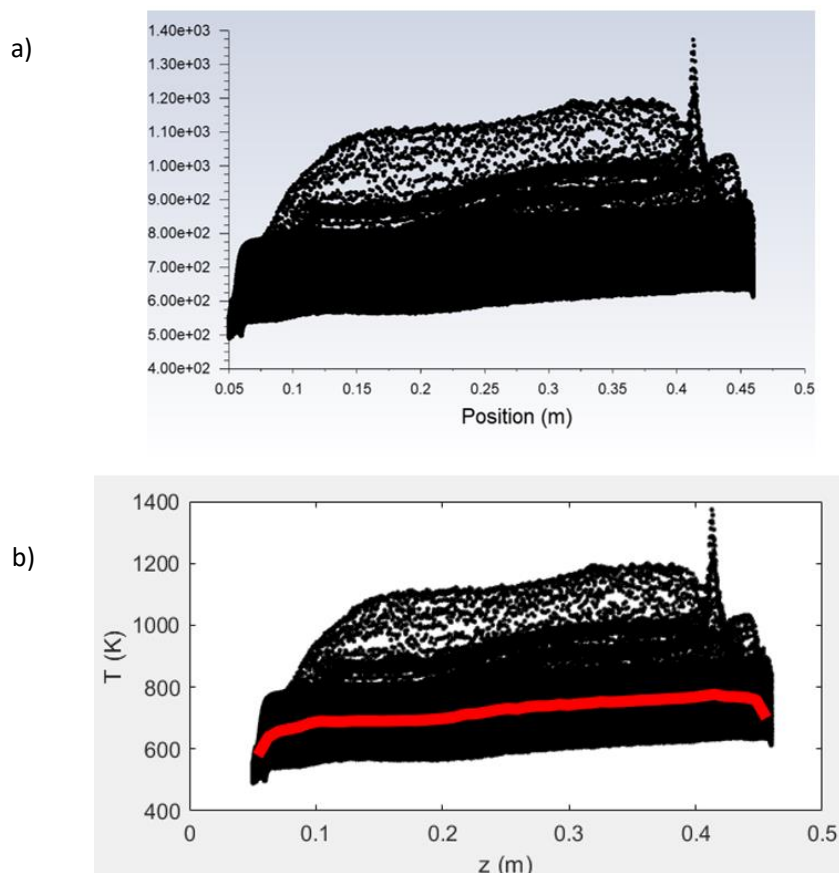
	Soubor txt <i>Střední kalorimetrická teplota</i>	Soubor txt <i>Střední teplota na stěně šneku</i>	Matlab <i>Výpočet</i>	<i>Otáčky</i> [min <sup>-1</sup> ]	<i>Průtok</i> [kg·s <sup>-1</sup> ]
1	P1-1RPM-1-CT	P1-1RPM-1-SCT	P1-1RPM-1	1	0,0092
2	P1-1RPM-2-CT	P1-1RPM-2-SCT	P1-1RPM-2	1	0,0046
3	P1-1RPM-3-CT	P1-1RPM-3-SCT	P1-1RPM-3	1	0,0029
4	P1-1RPM-4-CT	P1-1RPM-4-SCT	P1-1RPM-4	1	0,0023
5	P1-1RPM-5-CT	P1-1RPM-5-SCT	P1-1RPM-5	1	0,0011
6	P1-3RPM-1-CT	P1-3RPM-1-SCT	P1-3RPM-1	3	0,0275
7	P1-3RPM-2-CT	P1-3RPM-2-SCT	P1-3RPM-2	3	0,0137
8	P1-3RPM-3-CT	P1-3RPM-3-SCT	P1-3RPM-3	3	0,0086
9	P1-3RPM-4-CT	P1-3RPM-4-SCT	P1-3RPM-4	3	0,0069
10	P1-3RPM-5-CT	P1-3RPM-5-SCT	P1-3RPM-5	3	0,0034
11	P1-5RPM-1-CT	P1-5RPM-1-SCT	P1-5RPM-1	5	0,0458
12	P1-5RPM-2-CT	P1-5RPM-2-SCT	P1-5RPM-2	5	0,0229
13	P1-5RPM-3-CT	P1-5RPM-3-SCT	P1-5RPM-3	5	0,0144
14	P1-5RPM-4-CT	P1-5RPM-4-SCT	P1-5RPM-4	5	0,0114
15	P1-5RPM-5-CT	P1-5RPM-5-SCT	P1-5RPM-5	5	0,0057

Tabulka 7: Datové soubory pro jednotlivé simulace pro viskozitu 1.

Teplotu na stěně šneku podél osy z jsem zjistil jiným způsobem. Ve Fluentu jsem nechal vykreslit graf, kde na ose x je délka šnekového dopravníku a na ose y jsou teploty ze všech stěn šneku. Zvažoval jsem i druhou variantu, že bych zohledňoval jen teploty na plochách „Levy sroub“ a „Pravy sroub“, viz obrázek 36. Jedná se totiž o největší teplosměnné plochy. Nicméně tím bych ze hry vyloučil určité hodnoty, byť na první pohled

z méně významných ploch, a tak jsem počítal s teplotami na všech stěnách šneku. Výsledný graf ve Fluentu pro 3. měření při otáčkách  $n = 3$  RPM je na obrázku 42a). Bohužel se jeví nepřehledně, a tak jsem data stáhl opět do textového souboru a pokusil se pomocí softwaru MATLAB nalézt střední teploty na stěně podél šneku. Pokud ještě zůstanu u obrázku 42a), tak je dobré všimnout si několika zajímavých věcí. Zaprvé většina teplot na povrchu šneku se nachází v rozmezí přibližně 550 K až 850 K. Toto jsou ideální teploty z hlediska materiálů a zpracovávané látky. Další zajímavostí je teplotní peak, kde teplota dosahuje téměř 1400 K. Toto může být problém při skutečném provozu, kde je zapotřebí pohybovat se v určitém teplotním rozmezí. Extrémně vysoká teplota může znehodnotit jak samotný dopravník, tak i zpracovávaný materiál.

Střední teplotu na stěně jsem tedy hledal a našel pomocí skriptu napsaném v MATLABu. Délku šroubovice jsem rozdělil na 50 oken. Poté jsem spočítal šířku jednoho okna a pro každé okno určil střední teplotu povrchu stěny. Upravený graf se střední teplotou na stěně je na obrázku 42b).

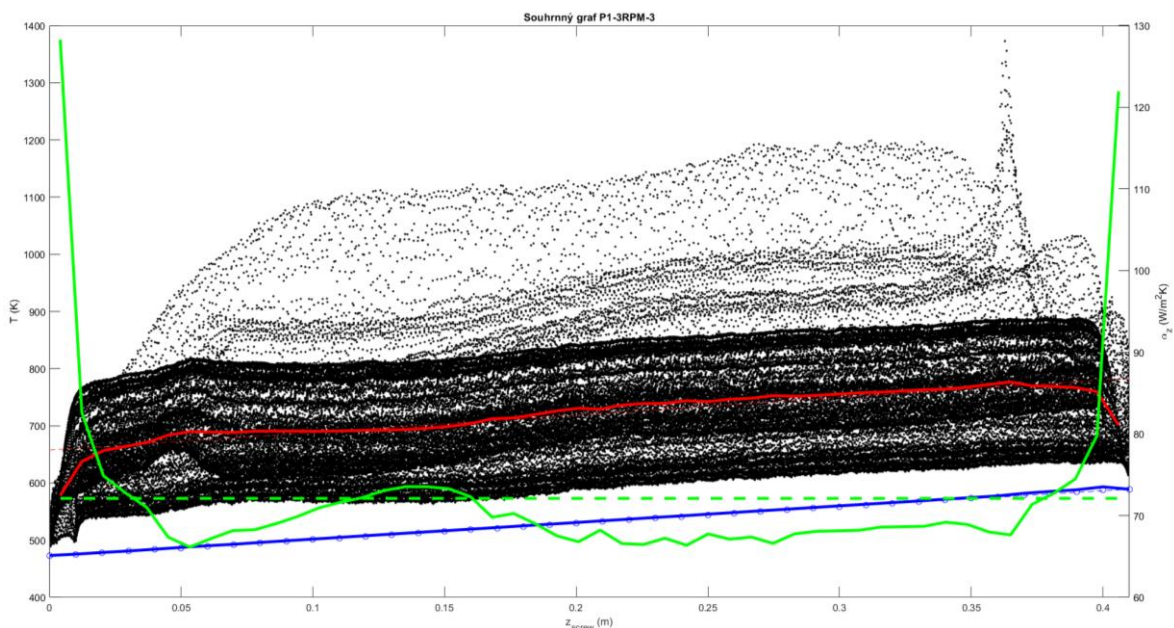


Obrázek 42: a) Teplota na povrchu šneku podél osy z - Fluent, b) Střední teploty na povrchu šneku - Matlab.

Finální grafické vynesení je na obrázku 43. V grafu se nachází více křivek. Červené křivky označují teplotu na stěně šneku. Přičemž čárkovaná červená čára značí lineární vývoj teploty na stěně a plná červená čára značí zprůměrované střední teploty na povrchu šneku. Modrá barva znázorňuje kalorimetrické teploty. Plná modrá obsahuje data ze simulace ve Fluentu. Pro porovnání s těmito daty slouží modré kroužky a modrá čárkovaná čára. Obojí jsou výsledné hodnoty kalorimetrických teplot získané z bilance. V případě čárkované čáry je interval hodnot rozdělen na 100 bodů a v každém bodě je počítána kalorimetrická teplota. Následně pro modré kroužky je načtená plocha šroubovice. Jsou to dvě mírně odlišné metody, ale výsledky pasují. Toto provádím, abych se ujistil, že jsou bilance v pořádku. Pro rekapitulaci uvádím, že jsem znal hmotnostní tok, tepelnou kapacitu, kalorimetrickou teplotu na vstupu, hustotu tepelného toku a plochu šneku. Neznámá pro mě byla kalorimetrická teplota na výstupu. Dvě základní rovnice jsem vypsal níže. Rovnice 40 představuje celkovou bilanci a rovnice 41 určuje lokální bilanci s lokální teplotou v místě  $x$ .

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_{out} - T_{in}) = q \cdot S \Rightarrow T_{out} \quad (40)$$

$$\dot{Q}_x = \dot{m} \cdot cp \cdot (T_x - T_{in}) = q \cdot S_x \Rightarrow T_x \quad (41)$$



Obrázek 43: Souhrnný graf P1-3RPM-3.

Ještě jsem nezmínil součinitel přestupu tepla, který ten je pod zelenou barvou. Výpočet jsem provedl podle rovnice (13). Hustotu tepelného toku jsem znal a k tomu jsem měl určené teploty na povrchu šneku. Musel jsem však interpolovat kalorimetrické teploty, jelikož potřebuji mít obě teploty (šneku a kalorimetrickou) ve stejném úseku šneku.

Plná zelená křivka vykresluje průběh součinitele přestupu tepla  $\alpha$  podél osy  $z$ . Čárkovaná čára značí střední hodnotu tohoto koeficientu  $\bar{\alpha}$ . A tuto střední hodnotu jsem následně využil k výpočtu střední hodnoty Nusseltova čísla  $\overline{Nu}$ . Použil jsem rovnici (42). Velikost  $\overline{Nu}$  jsem však počítal pouze pro tři simulace. Jsou to právě ty tři, které mají přibližně nulovou tlakovou ztrátu. Tedy při otáčkách  $n = 1$  RPM je to pro průtok  $\dot{m} = 0,0029$  kg·s<sup>-1</sup> a podobně  $n = 3$  RPM ( $\dot{m} = 0,0086$  kg·s<sup>-1</sup>) a  $n = 5$  RPM ( $\dot{m} = 0,0144$  kg·s<sup>-1</sup>). Poté jsem spočítal hodnoty Reynoldsova čísla. Opět uvádím příklad výpočtu v rovnici (43).

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} \cdot D}{\lambda} = \frac{72,11 \cdot 0,13}{0,15} = 62,495 \quad (42)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot D^2}{\mu} = \frac{752,6 \cdot \left(\frac{3}{60}\right) \cdot 0,13^2}{530,2} = 0,0012 \quad (43)$$

Ve chvíli, kdy mám všechny tři hodnoty  $\overline{Nu}$  a  $Re$ , mohu vytvořit graf. Výsledné  $\overline{Nu}$  -  $Re$  pro viskozitu 1 a 2 jsem vykreslil společně v jediném grafu. Graf se nachází na obrázku 47.

V následující tabulce 8 jsou sepsány matlabovské soubory pro viskozitu 1 a také naměřené a vypočítané hodnoty. Tím uzavírám viskozitu 1.

<i>Matlabovský soubor/Obrázek grafu</i>	<i>n</i> [min <sup>-1</sup> ]	<i>ṁ</i> [kg·s <sup>-1</sup> ]	<i>Δp</i> [Pa]	<i>Mk</i> [N·m]	<i>P</i> [W]	<i>α</i> [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	<i>Re</i> [-]	<i>Nu</i> [-]
P1-1RPM-1	1	0,0092	13714	9,823	1,029	25,288	-	-
P1-1RPM-2	1	0,0046	3739	10,184	1,066	28,717	-	-
P1-1RPM-3	1	0,0029	-34	10,32	1,081	30,853	0,0004	26,739
P1-1RPM-4	1	0,0023	-1249	10,364	1,085	29,887	-	-
P1-1RPM-5	1	0,0011	-3755	10,455	1,095	35,083	-	-
P1-3RPM-1	3	0,0275	40924	29,477	9,260	66,014	-	-
P1-3RPM-2	3	0,0137	11001	30,558	9,600	72,332	-	-
P1-3RPM-3	3	0,0086	-7	30,956	9,725	72,11	0,0012	62,495
P1-3RPM-4	3	0,0069	-3747	31,092	9,768	67,716	-	-
P1-3RPM-5	3	0,0034	-11340	31,366	9,854	73,182	-	-
P1-5RPM-1	5	0,0458	68136	49,131	25,725	101,26	-	-
P1-5RPM-2	5	0,0229	18480	50,926	26,665	107,2	-	-
P1-5RPM-3	5	0,0144	-1	51,59	27,015	103,39	0,002	89,605
P1-5RPM-4	5	0,0114	-6353	51,824	27,135	94,074	-	-
P1-5RPM-5	5	0,0057	-18785	52,274	27,370	97,512	-	-

Tabulka 8: Výsledné hodnoty měření viskozity 1.

Z této tabulky bych ještě rád vypíchl kroutící moment, respektive příkon šneku. Ukazuje se efekt „pohánění šneku“, kdy vyšší tlak na vstupu napomáhá otáčení šneku. A naopak, pokud je tlaková ztráta záporná, tak se příkon zvětšuje.

### 3.5. Vyhodnocení viskozity 2

Rovnou jsem přešel k vyhodnocení simulací pro taveninu polypropylenu s viskozitou  $\eta_2 = 363,5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Detailní sled operací a nastavení podmínek před spuštěním výpočtu neopakují, protože postup je stejný. I výpočetní model je shodný a vyhodnocení probíhá stejným způsobem. To znamená, že mohu rovnou přejít k výsledkům. U výpočtů jsem změnil jen viskozitu a sledoval jsem, jaké parametry se mění.

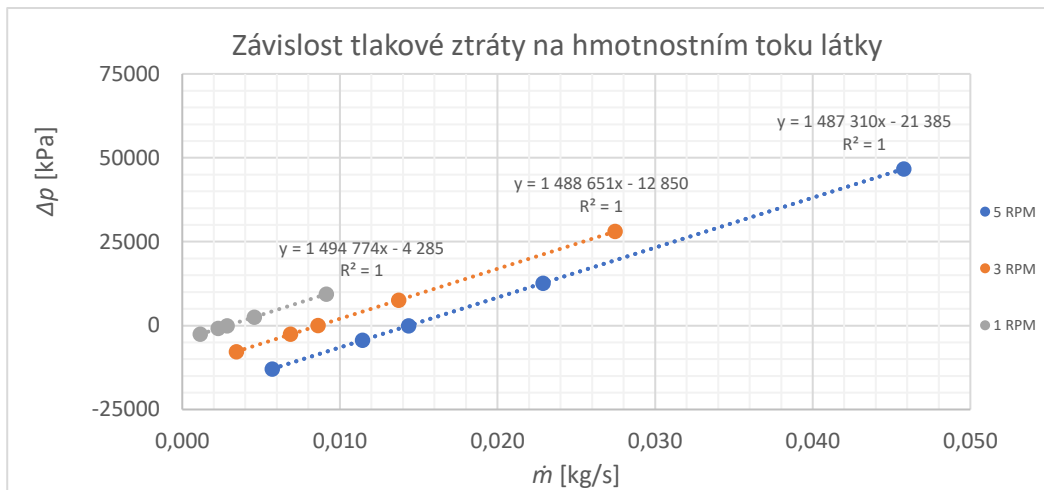
V tabulce 9 jsou zaznamenané datové soubory pro viskozitu 2. Pojmenování souborů vychází z principu, jaký jsem použil při předchozí úloze.



	Soubor txt <i>Střední kalorimetrická teplota</i>	Soubor txt <i>Střední teplota na stěně šneku</i>	Matlab  <i>Výpočty</i>	<i>Otáčky</i> [min <sup>-1</sup> ]	<i>Průtok</i> [kg·s <sup>-1</sup> ]
16	P2-1RPM-1-CT	P2-1RPM-1-SCT	P2-1RPM-1	1	0,0092
17	P2-1RPM-2-CT	P2-1RPM-2-SCT	P2-1RPM-2	1	0,0046
18	P2-1RPM-3-CT	P2-1RPM-3-SCT	P2-1RPM-3	1	0,0029
19	P2-1RPM-4-CT	P2-1RPM-4-SCT	P2-1RPM-4	1	0,0023
20	P2-1RPM-5-CT	P2-1RPM-5-SCT	P2-1RPM-5	1	0,0011
21	P2-3RPM-1-CT	P2-3RPM-1-SCT	P2-3RPM-1	3	0,0275
22	P2-3RPM-2-CT	P2-3RPM-2-SCT	P2-3RPM-2	3	0,0137
23	P2-3RPM-3-CT	P2-3RPM-3-SCT	P2-3RPM-3	3	0,0086
24	P2-3RPM-4-CT	P2-3RPM-4-SCT	P2-3RPM-4	3	0,0069
25	P2-3RPM-5-CT	P2-3RPM-5-SCT	P2-3RPM-5	3	0,0034
26	P2-5RPM-1-CT	P2-5RPM-1-SCT	P2-5RPM-1	5	0,0458
27	P2-5RPM-2-CT	P2-5RPM-2-SCT	P2-5RPM-2	5	0,0229
28	P2-5RPM-3-CT	P2-5RPM-3-SCT	P2-5RPM-3	5	0,0144
29	P2-5RPM-4-CT	P2-5RPM-4-SCT	P2-5RPM-4	5	0,0114
30	P2-5RPM-5-CT	P2-5RPM-5-SCT	P2-5RPM-5	5	0,0057

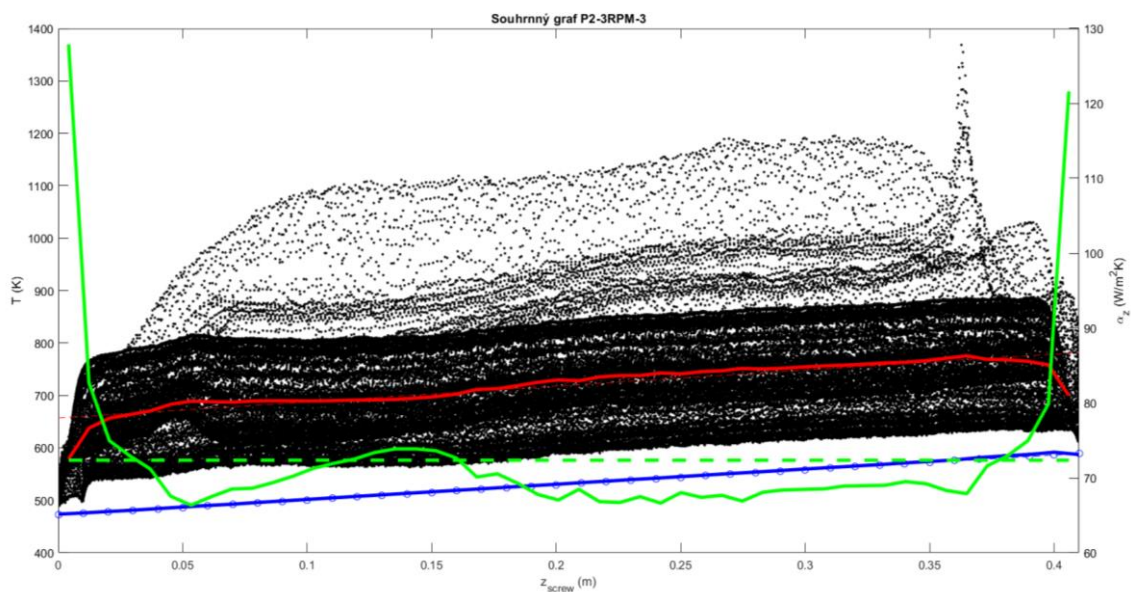
Tabulka 9: Datové soubory pro jednotlivé simulace pro viskozitu 2.

Obrázek 44 graficky znázorňuje tlakovou ztrátu při průtoku dopravníkem. Dochází ke stejnému efektu. První dva hmotnostní toky mají tlakovou ztrátu kladnou, kdežto čtvrtinový a osminový průtok je se zápornou tlakovou ztrátou. Při pohledu na vývoj tlakových ztrát při průtoku dopravníkem je zřejmé, že díky nižší viskozitě jsou tlakové ztráty menší. Platí to jak pro kladné, tak záporné hodnoty. Viskozita 2 je nižší o 166,8 Pa·s. To je o 31,5 %. Tlaková ztráta je nižší až o 12 %. Je pravděpodobné, že pokles tlakové ztráty bude pokračovat dále s klesající viskozitou.



Obrázek 44: Tlaková ztráta při různých průtocích a otáčkách  $n = 1, 3$  a  $5$  RPM pro viskozitu 2.

Na obrázku 45 se nachází souhrnný graf z měření hmotnostního průtoku při „nulové“ tlakové ztrátě a otáčkám 3 RPM. Při porovnání s grafem na obrázku 43 lze konstatovat, že výsledky jsou velmi podobné.



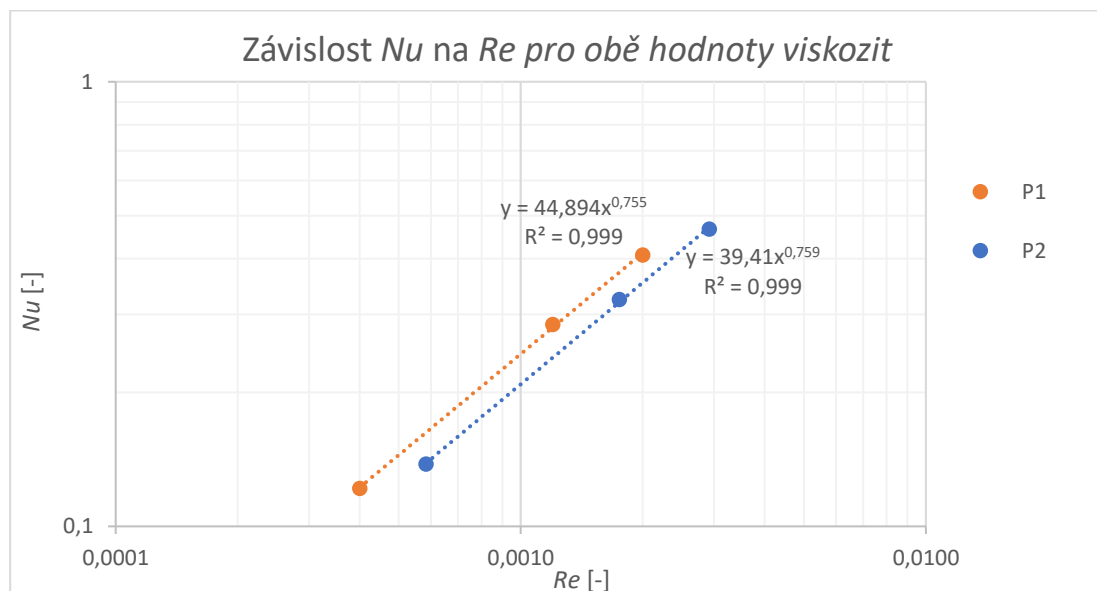
Obrázek 45: Souhrnný pro P2-3RPM-3.

Jak už jsem naznačil, na obrázku 46 jsou vyneseny spojnice charakterizující závislost střední hodnoty Nusseltova čísla na Reynoldově čísle. Opět se ukazuje vliv viskozity, který je promítnut v Prandtlově čísle. Konstanta, respektive směrnice přímky, je u druhé viskozity nižší. Je velice pravděpodobné, že směrnice bude nadále klesat s klesající viskozitou taveniny. Mocnina Reynoldsova čísla je pro obě varianty téměř stejná.

Předpisy  $Nu = f(Re, Pr)$  jsou:

$$Nu = 44,894 \cdot Re^{0,755} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (44)$$

$$Nu = 39,41 \cdot Re^{0,759} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (45)$$



Obrázek 46: Závislost  $\overline{Nu}$  na  $Re$  pro viskozitu 2.

Matlabovský soubor / Obrázek grafu	$n$ [1·min <sup>-1</sup> ]	$\dot{m}$ [kg·s <sup>-1</sup> ]	$\Delta p$ [Pa]	$Mk$ [N·m]	$P$ [W]	$\alpha$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	$Re$ [-]	$Nu$ [-]
P2-1RPM-1	1	0,0092	9402	6,735	0,705	25,288	-	-
P2-1RPM-2	1	0,0046	2564	6,982	0,731	28,73	-	-
P2-1RPM-3	1	0,0029	-23	7,075	0,741	30,868	0,0006	26,752
P2-1RPM-4	1	0,0023	-856	7,105	0,744	29,899	-	-
P2-1RPM-5	1	0,0011	-2574	7,167	0,751	35,091	-	-
P2-3RPM-1	3	0,0275	28057	20,209	6,349	66,002	-	-
P2-3RPM-2	3	0,0137	7542	20,950	6,582	72,289	-	-
P2-3RPM-3	3	0,0086	14	21,222	6,667	72,356	0,0018	62,709
P2-3RPM-4	3	0,0069	-2569	21,316	6,697	67,727	-	-
P2-3RPM-5	3	0,0034	-7775	21,504	6,756	73,283	-	-
P2-5RPM-1	5	0,0458	46713	33,683	17,637	-	-	-
P2-5RPM-2	5	0,0229	12669	34,914	18,281	108,2	-	-
P2-5RPM-3	5	0,0144	-1	35,37	18,521	104,12	0,0029	90,237
P2-5RPM-4	5	0,0114	-4356	35,529	18,603	94,704	-	-
P2-5RPM-5	5	0,0057	-12878	35,838	18,765	98,179	-	-

Tabulka 10: Výsledné hodnoty měření viskozity 2.

Tabulka 10 obsahuje názvy konečných matlabovských souborů a výsledné hodnoty. Efekt rostoucího kroutícího momentu, respektive příkonu s klesající tlakovou ztrátou je patrný v tomto případě. Kroutící moment je v porovnání s viskozitou 1 nižší přibližně o 31 % a stejně je tomu u příkonu. Koeficient přestupu tepla je v obou případech téměř stejný a tomu odpovídá i Nusseltovo číslo. Reynoldsovo číslo je větší a je to opět dáno nižší viskozitou taveniny.

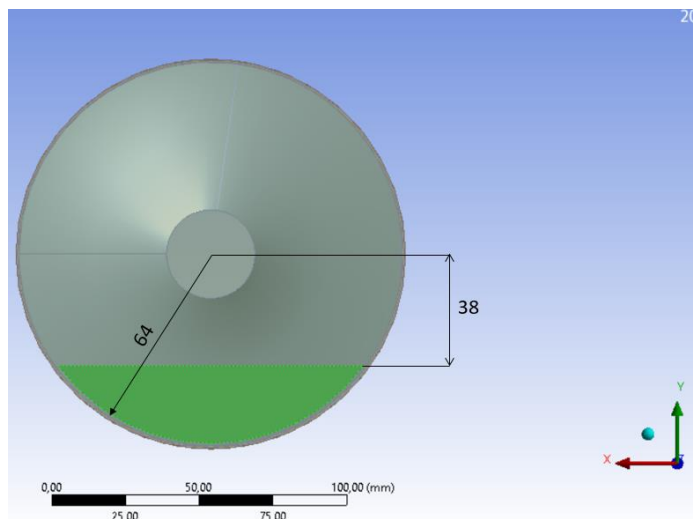
## 3.6. Výpočet částečně zaplněného šnekového dopravníku

Dostávám se k výpočtu šnekového dopravníku, který není zcela zaplněn. Jedná se o vícefázový tok dvou tekutin. Horní část dopravníku zaplňuje plyn a spodní část samozřejmě obsahuje taveninu polymeru. V literární rešerši jsem psal o součiniteli plnění a připojil jsem obrázky z literatury, ve které se autoři zabývali dopravou materiálu, výpočtem a numerickou simulací. Oproti simulaci plného dopravníku, je tato úloha poněkud složitější, a to z několika důvodů. Prvním je samotný fakt, že proudí dvě tekutiny. Vzniká tedy otázka, jaké zvolit okrajové podmínky pro jednotlivé fáze a jak to bude vypadat na rozhraní mezi taveninou a plynem. Druhým problémem je volba vícefázového modelu. Software ANSYS Fluent nabízí širokou paletu výpočtových schémat, které se liší kvalitou, respektive přesností výsledků a také výpočetním časem. Obecně platí, že přesnější výsledek také trvá déle. Třetí komplikací je právě čas. Jeden výpočet může zabrat, a dle literatury i opravdu zabírá, i několik dní. V každém případě také závisí na robustnosti geometrie a sítě. V mé úloze vycházím z modelu, který je složen téměř z jednoho milionu elementů. Geometrii a síť jsem nechal beze změn, kromě vstupní sekce, kde jsem se rozhodl udělat menší úpravu.

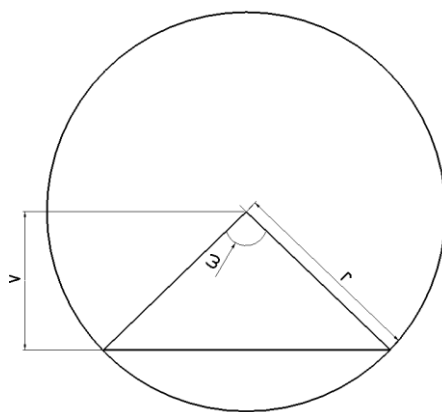
### 3.6.1. Popis nestacionární úlohy

Rozhodl jsem se modelovat dvoufázový tok taveniny a plynného dusíku. Pro taveninu jsem opět použil podmínku Mass flow Inlet na vstupu do dopravníku. Jelikož je cílem ustálit určitou hladinu v dopravníku, tak jsem vytvořil „půlměsíkový“ vstup. Horní hrana vstupu je ve vzdálenosti 38 mm od středové osy, viz obrázek 47. Pokud by hladina

taveniny v dopravníku dosahovala této úrovně, tak by měl být šnek zaplněn z 15 % neboli koeficient zaplnění šneku  $\psi = 15\%$ . Následující obrázek 48 a tabulka 11 doplňují pár dalších informací. Důležitý předpoklad v této úloze je, že tekutiny vzájemně neprostupují, nedochází k přestupu hmoty mezi taveninou a plynem. Reálně by k němu docházelo, ale uvažuji zjednodušený stav a zabývám se pouze přestupem tepla ze šneku do taveniny (a i plynu). Cílem je simulovat volnou hladinu ve šnekovém dopravníku.



Obrázek 47: Nový vstup pro taveninu.



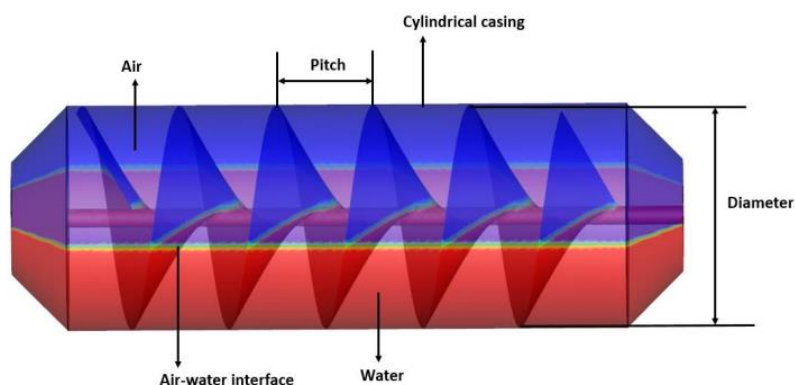
Obrázek 48: Schéma pro výpočet výšky hladiny.

Parametr	Značka	Jednotka	Hodnoty					
Koeficient plnění	$\psi$	[%]	5	10	15	25	35	45
Poloměr	$r$	[m]	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065
Zaplavená plocha	$S$	[m <sup>2</sup> ]	0,0007	0,0013	0,0020	0,0033	0,0046	0,0060
Výška od osy	$v$	[m]	0,052	0,045	0,038	0,026	0,015	0,051
Úhel	$\omega$	[°]	72,7	93,2	108,4	132,3	152,5	171,0

Tabulka 11: Parametry pro výpočet výšky hladiny.

### 3.6.2. Nastavení Fluentu pro nestacionární případ

Sarghini a kol. (2017) modelovali rozhraní voda-vzduch a použili nestacionární metodu VOF. Podobnost s mojí úlohou je vysoká, a tak jsem se rozhodl použít tuto publikaci jako vzor. Autoři simulují šnekový dopravník ve válcovém kanále s kuželovou přední a zadní částí. Na počátku simulace byla nastavena volná hladina, což lze pozorovat na obrázku 49. Následně během simulace autoři sledovali vzájemný pohyb tekutin [37].

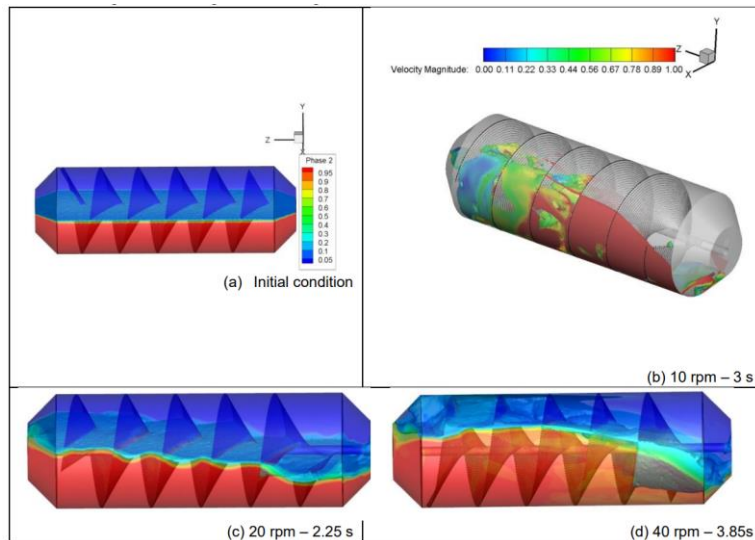


Obrázek 49: Počáteční stav [37].

Délka kanálu byla  $L = 1,8$  m a průměr byl  $Dt = 0,6$  m. Průtok na vstupu se rovnal  $\dot{m} = 0,16667$  kg·s<sup>-1</sup>. Hodnoty otáček byly  $n = 10, 20$  a  $40$  RPM. Jde mi hlavně o hydrodynamiku, tudíž objevující se tepelné procesy neřeším. Nastaveny byly tyto podmínky:

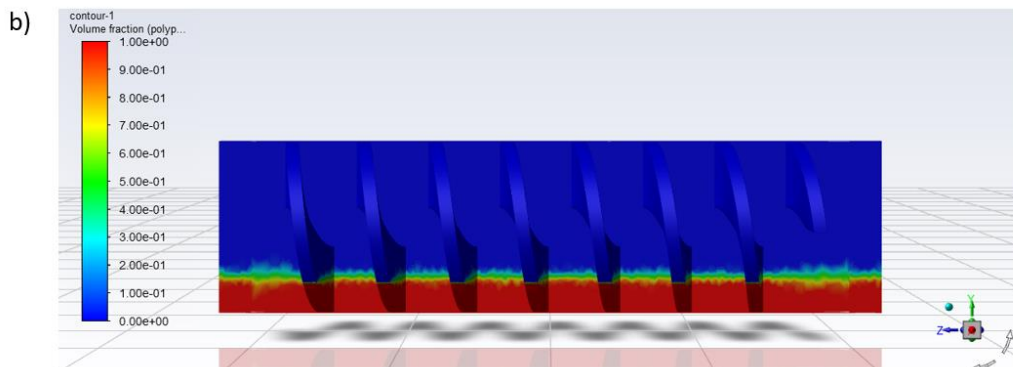
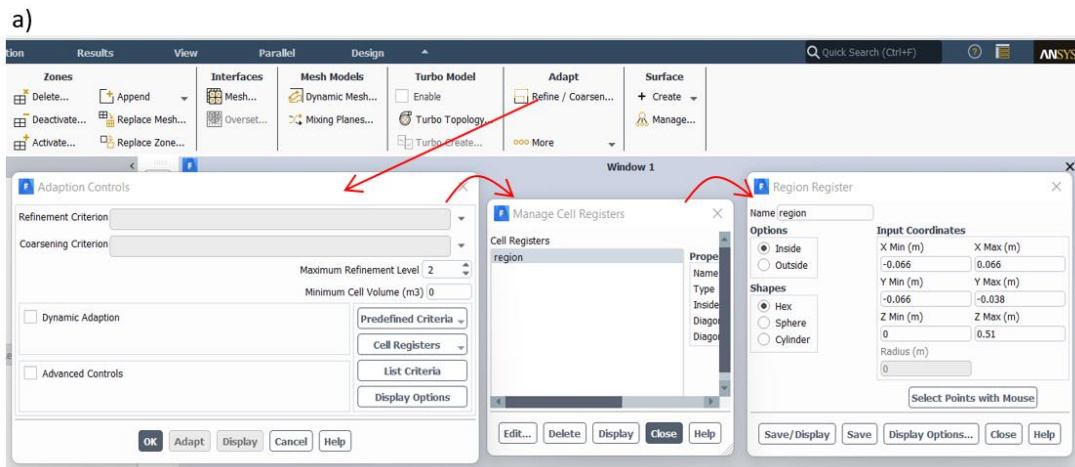
- nestacionární vícefázový model VOF se dvěma fázemi voda-vzduch
- povrchové napětí  $\sigma = 0,072$  N·m<sup>-1</sup> (oprava, v [37] je chybně napsáno  $0,72$  N·m<sup>-1</sup>)
- metoda Sliding Mesh
- výpočtové schéma SIMPLE
- prostorová diskretizace GREEN-GAUSS, pro tlak PRESTO, pro hybnost QUICK, objemový zlomek modifikovaný HRIC, a pro energii QUICK schéma
- časový krok byl zvolen  $t = 0,0004$  s

Autoři uvádí, že po 24 hodinách uběhl procesní čas  $0,25$  s. Jak se mění hladina a rychlostní profil během procesu je vidět na obrázku 50 [37].



Obrázek 50: Ukázka počátečního stavu a), mění se rychlostní profil b), a mění se hladina během procesu c), d) [37].

Začal jsem tedy s nastavením úlohy. Začal jsem kontrolou sítě tlačítkem Check Mesh a spustil transformaci sítě pomocí funkce Make Polyhedra. Poté nastala první změna a ta spočívala ve zvolení režimu Transient, tedy nestacionární úlohy. Dále jsem se pokusil docílit počátečního stavu tak, jako je na obrázku 49.



Obrázek 51: a) Nastavení počátečního rozložení polypropylen-dusík, b) zobrazení v rovině yz a šneku.

Nastavení počátečního rozložení tekutin spolu s postupem jsou vyobrazeny na obrázku 51. Jen doplním, že nastavení výšky hladiny je pro koeficient plnění  $\psi = 0,15$ . To odpovídá vzdálenosti od středové osy  $v = 0,038$  m. Obrázek 51b) znázorňuje výskyt polypropylenu a dusíku. Oblasti se 100% výskytem polypropylenu jsou sytě červené. Objemový podíl polypropylenu je v těchto místech  $\alpha_q = 1$ . A naopak místa, kde polypropylen není jsou tmavě modré a  $\alpha_q = 0$ . Rozhraní polypropylen-dusík obsahuje podíl každé z fází. Potom  $0 < \alpha_q < 1$ .

### *a) Model*

Pokračoval jsem v dalším nastavování podmínek. Opět jsem nastavil parametry materiálu polypropylen a v sekci Models zvolil Multiphase. Nabídka modelů je opravdu pestrá. Já jsem označil Volume of Fluid a Implicit Volume Fraction parameters. V další záložce jsem pojmenoval primární a sekundární fázi, a nakonec nastavil povrchové napětí mezi tekutinami  $\sigma = 0,03 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ . Stejně jako u zcela zaplněného dopravníku jsem zapnul energetickou rovnici a také zvolil laminární režim.

### *b) Cell Zone podmínka*

Nastavení Cell Zone podmínky je stejné jako pro plný šnek. Pohybující se rámeček neboli inner\_fluid se otáčí s danou hodnotou otáček okolo osy -z. Pro statickou kapalinu outer\_fluid se nemusí nastavovat nic. A jelikož se jedná o nestacionární úlohu, tak je nutné zvolit Sliding Mesh (Mesh Motion).

### *c) Okrajové podmínky*

Mezi okrajové podmínky se řadí průtok taveniny  $\dot{m}$ , konstantní hustota tepelného toku  $q$ , otáčení šneku, teplota taveniny na vstupu. Při stanovení průtoku jsem v tomto případě použil vztah 35. Koeficient plnění  $\psi$  se již nerovná jedné.



#### d) Výpočetní metoda a spuštění výpočtu

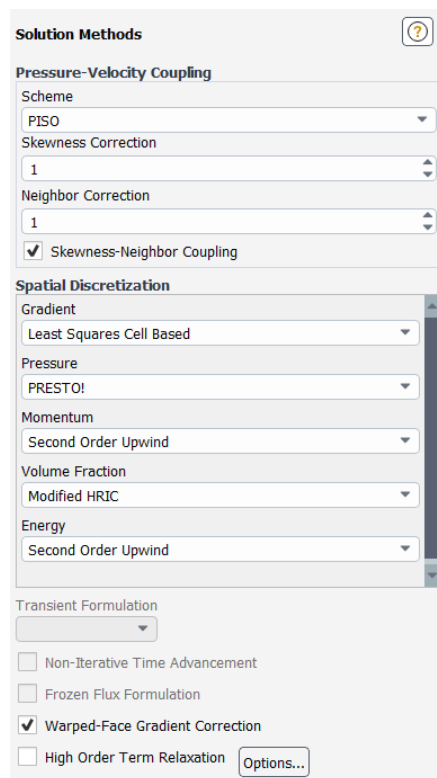
Výpočetní schéma jsem volil dle [37]. Změnu jsem udělal u časového kroku, který jsem zvolil adaptivní.

#### e) výsledek

Řešení nebylo nalezeno. Nestacionární vícefázová simulace je natolik náročná úloha, že ani po několika dnech nebylo dosaženo žádných výsledků. Simulaci jsem opakovl několikrát, vždy s nějakou novou úpravou. Výsledek však byl stejný, respektive negativní.

### 3.6.3. Nastavení Fluentu pro stacionární případ

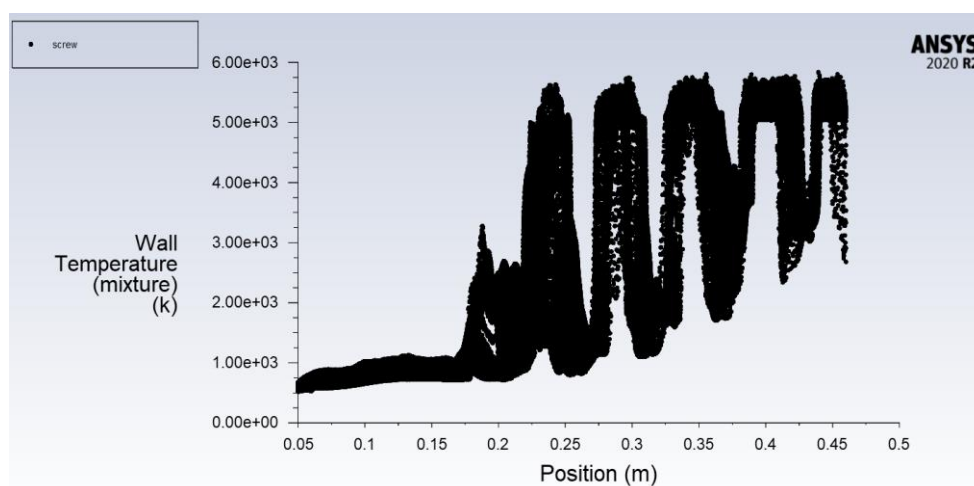
Jelikož jsem při nestacionární úloze nenalezl řešení, pokusil jsem se o stacionární simulaci. V úvodu jsem tedy prohodil Transient za Steady. V Cell Zone podmínce jsem zvolil Frame Motion (MRF). Nastavení materiálů a okrajových podmínek jsou stejná. Řešení bylo hledané pomocí nastavení, viz obrázek 52.



Obrázek 52: Nastavení řešení.

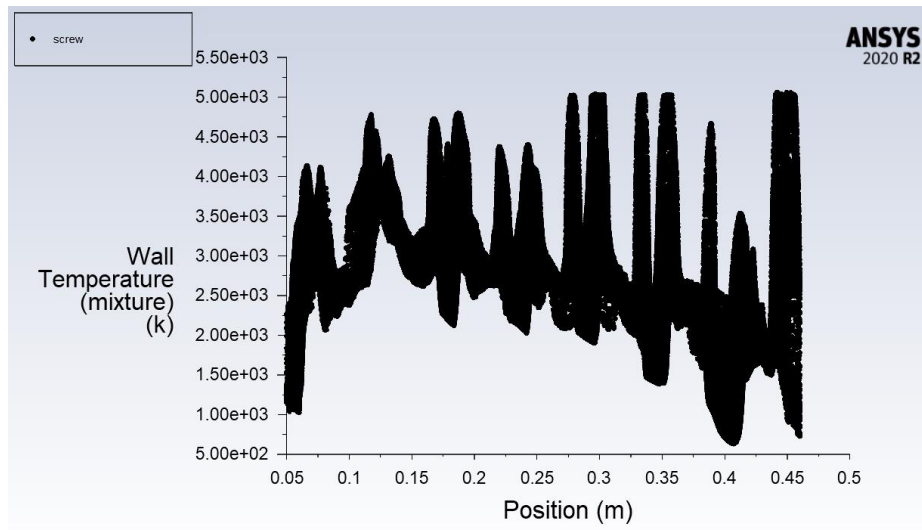
Na počátku jsem zvolil 20 000 iterací. Po dopočítání jsem simulaci spustil znovu. V softwaru ANSYS Fluent je možné nastavit automatické ukládání výpočtů. Při počítání velkých a časově náročných úloh je automatické ukládání výhodné. A to zejména v případě, kdy dojde k nečekanému výpadku připojení, a tedy ztrátě neuložených výsledků.

Po dopočítání úlohy jsem si nechal vykreslit graf teploty na stěně šneku podél osy z. Graf se nachází na obrázku 53. Šnek není nijak rozdělen na oblast, kde se nachází tavenina a kde plyn. Výsledek je takový, že minimální teplota na stěně je 590 K. Maximální teplota na stěně je 5 694 K. Rozdíl mezi minimem a maximem je tedy více jak 5 000 K. Takto vysoké teploty stěny jsou hlavně v oblastech, které jsou vyplněny plynem. Je to dáno nízkou schopností plynu odvádět teplo z povrchu. Graf vypadá sice zajímavě, ale je zřejmé, že model dosahující takových výsledků nemá šanci na další analýzu. V praxi je docílení takových stavů silně nereálné. Navíc, odečtený krouticí moment  $M_k$  byl pouhých 0,21 N·m.



Obrázek 53: Teplota na stěně šneku podél souřadnice z.

S ohledem na předchozí výstup jsem v další simulaci změnil některé parametry. Jednak jsem snížil hustotu tepelného toku  $q$ . Nynější hodnota je  $q = 4440,1$  W. Cílem této změny by měla být nižší teplota na povrchu šneku. Dále jsem nastavil viskozitu  $\mu = 1$  Pa·s. Toto jsem vyzkoušel, abych měl alespoň porovnání, zda a jaký vliv mají měněné parametry. Přibližně po 60 000 iteracích jsem výpočet zastavil a zkontroloval teplotu na stěně. Na obrázku 54 je graf.



Obrázek 54: Teplota na stěně podél souřadnice z.

Výsledek však není o mnoho lepší. Maximální teplota je sice nižší než v předchozím případě, rozdíl ale činí pouze 646 K. Otázkou tedy je, jestli na současném modelu a při dalším snížení hustoty tepelného toku, je možné docílit rozumných teplotních úrovní. Z časových důvodů však nejsem schopen dalšího vývoje a posunutí úlohy ke zdárnému řešení.

## 4. Závěr

---

V této práci jsem zpracovával téma přestup tepla mezi šnekem a kapalinou. Po rešeršní části, kde jsem popsal děje spojené s přestupem tepla a s dopravou materiálu, jsem se pustil do simulace přestupu tepla ve šnekovém dopravníku. Modeloval jsem 2 varianty s kompletně zaplněným dopravníkem a také částečně zaplněný dopravník s volnou hladinou. Varianty u první úlohy se lišily hodnotou dynamické viskozity kapaliny – taveniny. Lze konstatovat, že obě viskozity byly velmi vysoké, avšak ne nereálné. Na počátku děje, kdy se teplota taveniny pohybuje okolo 200 °C, může za daných podmínek viskozita taveniny dosahovat i zmíněných 530 Pa·s. Nicméně v průběhu dopravy a ohřevu taveniny v reálném provozu dochází k výraznému poklesu viskozity. V mé práci jsem efekt změny viskozity, ale i jiných veličin, nezohledňoval.

Pro obě hodnoty viskozity jsem provedl 15 simulací, dohromady tedy 30. Šnek dopravníku se postupně otáčel třemi různými hodnotami otáček  $n$ , a to 1, 3 a 5 min<sup>-1</sup>. Pro každou rychlost otáčení jsem simuloval 5 procesů, které se lišily velikostí hmotnostního průtoku  $\dot{m}$  na vstupu do dopravníku. Klíčovou okrajovou podmínkou procesu byla konstantní hustota tepelného toku  $q = 13\,333 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  na povrchu šneku. Pro každou simulaci jsem vyhodnotil tlakovou ztrátu  $\Delta p$ , kroutící moment na šneku  $M_k$ , příkon  $P$ , průběh střední kalorimetrické teploty  $T_m$  a průběh teploty na stěně šneku  $T_w$ . Zejména textový soubor s průběhem teploty na stěně šneku obsahuje velké množství dat. Pro jednu souřadnici totiž existuje více teplot. To je dáno tvarem šneku. Z tohoto důvodu jsem vyhodnocení teplot a součinitele přestupu tepla prováděl v softwaru MATLAB. Jednotlivé skripty jsem v textu neuváděl. V práci jsem uvedl tabulky s názvy textových souborů a s názvy skriptů a tyto soubory jsou přístupné jakožto příloha diplomové práce. Z teplot a hustoty tepelného toku jsem získal součinitel přestupu tepla  $\alpha$ . Po nalezení střední hodnoty  $\bar{\alpha}$  jsem vypočítal Nusseltovo číslo, vytvořil graf  $\overline{Nu} - Re$  a stanovil předpis  $\overline{Nu} = f(Re, Pr)$ .

V případě modelu s částečně zaplněným dopravníkem jsem počítal hodně simulací. Řešil jsem nestacionární i stacionární úlohu. Mé snažení se však nepovedlo dotáhnout do stavu, který bych mohl považovat za uspokojivý. Simulování volné hladiny v dopravníku je časově velice náročné a vyžaduje technickou odolnost výpočetního zařízení.

Na úplný závěr bych chtěl zmínit, že tato práce může sloužit jako odrazový můstek pro další diplomanty. Toto je možné díky sestavenému funkčnímu výpočetnímu modelu šnekového dopravníku a předpisu v softwaru MATLAB na vyhodnocení získaných dat.

# Seznam obrázků

---

OBRÁZEK 1: ŠNEKOVÝ DOPRAVNÍK. 1 – ELEKTROMOTOR, 2 – SPOJKA, 3 -LOŽISKO, 4 – ŠNEK, 5 – VODÍCÍ LOŽISKO, 6 – ŽLAB, 7 - VÍKO [1]. .....	9
OBRÁZEK 2: KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ ŠNEKOVÉHO DOPRAVNÍKU. A), B) – KORYTOVÉ, C) – TRUBKOVÝ [2].	10
OBRÁZEK 3: KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ŠNEKŮ [3]. .....	11
OBRÁZEK 4: SCHÉMA VYTLAČOVACÍHO STROJE [5] .....	12
OBRÁZEK 5: HLAVNÍ ZÓNY ŠNEKU [5] .....	14
OBRÁZEK 6: GEOMETRIE ŠROUBOVÉHO ČERPADLA [6]. .....	15
OBRÁZEK 7: SCHÉMA FYZIKÁLNĚ – CHEMICKÝCH POCHODŮ [3]. .....	18
OBRÁZEK 8: PYROLÝZNÍ JEDNOTKA SE ŠNEKOVÝM DOPRAVNÍKEM [3]. .....	19
OBRÁZEK 9: GRAF NAPĚTÍ NA RYCHLOSTI DEFORMACE. 1-NEWTONSKÁ KAPALINA, 2-BINGHAMSKÁ, 3- PSEUDOPLASTICKÁ, 4-DILATANTNÍ. ....	21
OBRÁZEK 10: PRŮBĚH TEPLoty V BLÍZKOSTI STĚNY [12]. .....	23
OBRÁZEK 11: OKRAJOVÁ PODMÍNKA NA STĚNĚ. A) SPODNÍ DESKA JE IZOLOVANÁ, HORNÍ POHYBUJÍCÍ SE DESKA S KONSTANTNÍ HUSTOTOU TEPELNÉHO TOKU, B) SPODNÍ DESKA S KONSTANTNÍ HUSTOTOU TEPELNÉHO TOKU, HORNÍ DESKA JE POHYBLIVÁ A IZOLOVANÁ [14]. ....	24
OBRÁZEK 12: PRŮBĚH $\theta$ V KANÁLE. A) $BR = 0$ , RŮZNÉ $U^*$ , B) $U^* = 0$ A RŮZNÁ $BR$ , C) PRŮBĚH $NU$ , RŮZNÁ $U^*$ A RŮZNÁ $BR$ [14]. .....	25
OBRÁZEK 13: KORELACE PRO VÝPOČET NUSSELTOVA ČÍSLA [15]. .....	27
OBRÁZEK 14: NUSSELTOVO ČÍSLO A ZÁVISLOST NA BEZORMĚRNÉ DÉLCE, INDEXU TOKU A POMĚRU PRŮMĚRŮ VÁLCŮ [16]. .....	28
OBRÁZEK 15: PRŮBĚH NUSSELTOVA ČÍSLA V ZÁVISLOSTI NA POMĚRU PRŮMĚRŮ [17]. ....	29
OBRÁZEK 16: TEPLota STĚNY PODÉL OSY V ZÁVISLOSTI NA MĚNÍCÍM SE RE A KONSTANTNÍ HUSTOTĚ TEPELNÉHO TOKU [18]. ....	29
OBRÁZEK 17: SCHÉMA ZAŘÍZENÍ [19]. .....	30
OBRÁZEK 18: KOEFICIENT PŘESTUPU TEPLA NA TEPLotĚ [19]. .....	31
OBRÁZEK 19: BEZOSÝ ŠNEK S PARAMETRY A SOUŘADNICEMI [24]. .....	33
OBRÁZEK 20: ELEKTRICKY VYTÁPĚNÝ DOPRAVNÍK [25]. ....	35
OBRÁZEK 21: DETAILNÍ POHLED NA BEZOSÝ ŠNEK [25]. .....	35
OBRÁZEK 22: FYZIKÁLNÍ MODEL PRO FUNKČNÍ ZÓNY VYVÍJEJÍCÍ SE PODÉL ŠROUBOVÉHO KANÁLU [26]. .....	37
OBRÁZEK 23: ROZLOŽENÍ TLAKU A RELATIVNÍ PODÍL PEVNÝCH ČÁSTIC PODÉL DÉLKY EXTRUDÉRU [26]. .....	38
OBRÁZEK 24: DIAGRAM ZNÁZORŇUJÍCÍ PROMĚNNÉ: VÝKON, TEPLotu TAVENINY, DÉLKU EXTRUDÉRU, HMOT. TOK NA VÝSTUPU, WATS A POMĚR TEPLot V ZÁVISLOSTI NA ROZDÍLNÝCH OTÁČKÁCH [26]. .....	39
OBRÁZEK 25: GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ A SOUČINITELE PLNĚNÍ DOPRAVNÍKU [1]. .....	39
OBRÁZEK 26: TOK MATERIÁLU BĚHEM OTÁČENÍ ŠNEKU PŘI RŮZNÉM PLNĚNÍ. 1 - HŘÍDEL, 2 - ŠNEK, 3 - ŽLAB. A, B, C – PŘEDNÍ POHLED, A', B', C' - BOČNÍ POHLED [27]. .....	40

OBRÁZEK 27: CFD SIMULACE VÍCEFÁZOVÉHO MODELU EULER-EULER [3D EULERIAN-EULERIAN MODELING OF A SCREW REACTOR FOR BIOMASS] [28].	41
OBRÁZEK 28: ZÁVISLOST OBJEMOVÉHO PRŮTOKU A OTÁČEK PŘI RŮZNÝCH KOEFICIENTECH PLNĚNÍ [30].	42
OBRÁZEK 29: ZÁVISLOST PŘÍKONU A OTÁČEK PRO RŮZNÉ PRŮMĚRY ŠNEKU A PŘI KOEFICIENTU PLNĚNÍ [30].	42
OBRÁZEK 30: SPECIFICKÝ OBJEM RŮZNÝCH MATERIÁLŮ PŘI TLAKU $P = 1$ BAR A ZÁVISLOSTI NA TEPLITĚ [31].	43
OBRÁZEK 31: KŘIVKY POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ ZOBRAZUJÍCÍ ZÁVISLOST TEPELNÉ VODIVOSTI NA TEPLITĚ [31].	44
OBRÁZEK 32: MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA $CP$ PRO POLYPROPYLEN [33].	45
OBRÁZEK 33: KÓTOVANÁ SKICA ŠNEKOVNICE.	49
OBRÁZEK 34: A) MODEL DOPRAVNÍKU S POPISKY, B) PROPOZICE MODELU, C) DETAIL ROTAČNÍ A STATICKÉ ZÓNY.	51
OBRÁZEK 35: KVALITA SÍTĚ, POČET ELEMENTŮ A NÁZVY PLOCH.	52
OBRÁZEK 36: POJMENOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH PLOCH ŠNEKU.	53
OBRÁZEK 37: VÝSLEDNÁ PODOBA SÍTĚ NA VNĚJŠÍ STRANĚ.	53
OBRÁZEK 38: NASTAVENÍ "VNITŘNÍ TEKUTINY".	56
OBRÁZEK 39: VÝPOČETNÍ METODY.	57
OBRÁZEK 40: TLAKOVÁ ZTRÁTA PŘI RŮZNÝCH PRŮTOCÍCH A OTÁČKÁCH $N = 1, 3$ A $5$ RPM PRO VIZKOZITU 1.	58
OBRÁZEK 41: UKÁZKA ŘEZŮ V ROVINĚ $XY$ .	59
OBRÁZEK 42: A) TEPLOTA NA POVRCHU ŠNEKU PODÉL OSY $Z$ - FLUENT, B) STŘEDNÍ TEPLITY NA POVRCHU ŠNEKU - MATLAB.	61
OBRÁZEK 43: SOUHRNNÝ GRAF $P1-3RPM-3$ .	62
OBRÁZEK 44: TLAKOVÁ ZTRÁTA PŘI RŮZNÝCH PRŮTOCÍCH A OTÁČKÁCH $N = 1, 3$ A $5$ RPM PRO VIZKOZITU 2.	66
OBRÁZEK 45: SOUHRNNÝ PRO $P2-3RPM-3$ .	66
OBRÁZEK 46: ZÁVISLOST $Nu$ NA $Re$ PRO VIZKOZITU 2.	67
OBRÁZEK 47: NOVÝ VSTUP PRO TAVENINU.	69
OBRÁZEK 48: SCHÉMA PRO VÝPOČET VÝŠKY HLADINY.	69
OBRÁZEK 49: POČÁTEČNÍ STAV [37].	70
OBRÁZEK 50: UKÁZKA POČÁTEČNÍHO STAVU A), MĚNÍCÍ SE RYCHLOSTNÍ PROFIL B), A MĚNÍCÍ SE HLADINA BĚHEM PROCESU C), D) [37].	71
OBRÁZEK 51: A) NASTAVENÍ POČÁTEČNÍHO ROZLOŽENÍ POLYPROPYLEN-DUSÍK, B) ZOBRAZENÍ V ROVINĚ $YZ$ A ŠNEKU.	71
OBRÁZEK 52: NASTAVENÍ ŘEŠENÍ.	73
OBRÁZEK 53: TEPLOTA NA STĚNĚ ŠNEKU PODÉL SOUŘADNICE $Z$ .	74
OBRÁZEK 54: TEPLOTA NA STĚNĚ PODÉL SOUŘADNICE $Z$ .	75

# Seznam tabulek

---

TABULKA 1: PODMÍNKY DOPRAVY SYPKÝCH MATERIÁLŮ [1]. .....	40
TABULKA 2: VLASTNOSTI PP PRO ARHENIŮV VZTAH [32]. .....	45
TABULKA 3: ROZMĚRY ŠNEKOVÉHO DOPRAVNÍKU. ....	49
TABULKA 4: VLASTNOSTI TAVENINY POLYPROPYLENU PŘI $T = 200$ °C. ....	55
TABULKA 5: VLASTNOSTI OCELOVÉHO ŠNEKU A KANÁLU. ....	55
TABULKA 6: OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO TAVENINU PŘI OTÁČKÁCH $N = 3$ RPM A MĚŘENÍ ČÍSLO 1. ....	57
TABULKA 7: DATOVÉ SOUBORY PRO JEDNOTLIVÉ SIMULACE PRO VIZKOZITU 1. ....	60
TABULKA 8: VÝLEDNÉ HODNOTY MĚŘENÍ VIZKOZITY 1. ....	64
TABULKA 9: DATOVÉ SOUBORY PRO JEDNOTLIVÉ SIMULACE PRO VIZKOZITU 2. ....	65
TABULKA 10: VÝLEDNÉ HODNOTY MĚŘENÍ VIZKOZITY 2. ....	67
TABULKA 11: PARAMETRY PRO VÝPOČET VÝŠKY HLADINY. ....	69



## Seznam použité literatury

---

- [1] DRAŽAN, F. a kol. *Teorie a stavba dopravníku*. Praha: ČVUT, 1983. 290 s.
- [2] M-tec CZ, s.r.o. Chrudim. Šnekové dopravníky. TMT. [cit. 30.3.2022]. [Online] Dostupné na: <http://www.m-tec.cz/vyrobky/dopravni-a-davkovaci-systemy/snekove-dopravniky/>.
- [3] CAMPUZANO, F., R. C. BROWN. *Auger reactors for pyrolysis of biomass and wastes*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2019, 102, 372-409. [cit. 26.3.2022]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.014>.
- [4] RAUWENDAAL, Chris. *Polymer Extrusion*. 5th ed. Munich: Hanser, 2014. ISBN 978-1-56990-516-6.
- [5] LAFLEUR, P. G., B. VERGNES. *Polymer Extrusion*. Hoboken, NJ: Wiley, 2014. ISBN 978-1-84821-650-1.
- [6] MORAVEC, J., J. SKOČILAS. *Zařízení a technologie zpracování plastů a silikátů* [přednáška]. Praha: ČVUT v Praze.
- [7] JÍLKOVÁ, L., K. CIAHOTNÝ, R. ČERNÝ. Technologie pro pyrolýzu paliv a odpadů. In: *PALIVA* [online]. 2012, 3, 74-80. [cit. 26.3.2022]. Dostupnost z: DOI: 10.35933/paliva.2012.03.03.
- [8] VOŠTOVÁ, V., J. FRIES. *Zpracování pevných odpadů*. Praha: ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02672-8.
- [9] GOOTY, A.Tumbalam. *Fractional condensation of bio-oil vapors* [online]. 2013 [cit. 18.2.2022]. Dostupné z: <http://ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=2387&context=etd>
- [10] NOVÁK, J. Výhřevnosti paliv. In: TZBinfo [online]. [cit. 20.2.2022]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [11] ŠŤASTNÁ, J. Pyrolýzní jednotka pro plasty už není jen teorií. ODPADY [online]. [cit. 20.2.2022]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/pyrolyzni-jednotka-pro-plasty-uz-neni-jen-teorii/>
- [12] ŠESTÁK, J., F. RIEGER. *Přenos hybnost tepla a hmoty*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02933-6

- [13] *Základy reologie a reometrie kapalin* MUNI [online]. [cit. 24.3.2022]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1431/podzim2014/C5160/um/2457585/2457594/Reologie\\_a\\_reometrie\\_kapalin.pdf](https://is.muni.cz/el/1431/podzim2014/C5160/um/2457585/2457594/Reologie_a_reometrie_kapalin.pdf)
- [14] AYDIN, O., A. METE. *Laminar forced convection with viscous dissipation in a Couette-Poiseuille flow between parallel plates*. In: Applied Energy [online]. 2006, 83, 856-867. [cit. 20.5.2022]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.08.005>.
- [15] FÉNOT, M., Y. BERTIN, E. DORIGNAC, G. LALIZEL. *A review of heat transfer between concentric rotating cylinders with or without axial flow*. In: International Journal of Thermal Sciences [online]. 2011, 50, 1138-1155. [cit. 25.5.2022]. ISSN 1290-0729. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.02.013>.
- [16] HONG, S-N., J. C. MATTHEWS. *Heat transfer to non-newtonian fluids in laminar flow through concentric annuli*. In: International Journal of Heat and Mass Transfer. 1969, 12, 1699-1703. [cit. 30.4.2022]. ISSN 0017-9310. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90101-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90101-X).
- [17] FARIAS, M. H., C. V. M BRAGA, P. R. de SOUZA MENDES. *Heat transfer coefficients for the laminar fully developed flow of viscoplastic liquids through annuli*. In: International Journal of Heat and Mass Transfer. 2009, 52, 3257-3260. [cit. 16.6.2022]. ISSN 0017-9310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.008>.
- [18] SHKARAH, A., M. I. HASAN, I. K. ERAEBEE. *Analytical Study of Combined Convection Heat Transfer for Flow in a Horizontal Annulus*. In: Thi-Qar University Journal of Engineering Sciences. 2011, 2, 26-40. [cit. 1.6. 2022]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/242299324\\_Analytical\\_Study\\_of\\_Combined\\_Convection\\_Heat\\_Transfer\\_for\\_Flow\\_in\\_a\\_Horizontal\\_Annulus](https://www.researchgate.net/publication/242299324_Analytical_Study_of_Combined_Convection_Heat_Transfer_for_Flow_in_a_Horizontal_Annulus)
- [19] SUZUKI, T., T. OKAZAKI, K. YAMAMOTO, H. NAKATA, O. FUJITA. *Improvements in Pyrolysis of Waste in an externally Heated Rotary Kiln*. In: Journal of Thermal Science and Technology [online]. 2008, 3, 523-531. [cit. 30.5.2022]. ISSN 1880-5566. Dostupné z: <https://doi.org/10.1299/jtst.3.523>
- [20] MORAVEJI, M. K., E. ESMAEILI. *Comparison between single-phase and two-phases CFD modeling of laminar forced convection flow of nanofluids in a circular tube under constant heat flux*. In: International Communications in Heat and Mass Transfer [online]. 2012, 39, 1297-1302. [cit 23.7.2022]. ISSN 0735-1933. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.07.012>.

- [21] DITTUS, F. W., L. K. M. BOELTER. *Heat transfer in Automobile Radiators of the Tubular Type*. University of California Publication in Engineering, California. 1930.
- [22] CHAVAN, V. V. *Close-Clearance Helical Impellers: A Physical model for Newtonian Liquids at Low Reynolds Numbers*. In: *AIChE Journal* [online]. 1983, 29, 177-186. [cit. 25.7.2022]. Dostupné z: <https://aiche-onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.techlib.cz/doi/pdf/10.1002/aic.690290202>
- [23] VRÁNA, V. *Elektrické teplo* [přednáška] [online]. Ostrava: VŠB, 2008. [cit. 13.5.2022]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FMMI/Prednasky/TEPLO\\_bc\\_08.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/TEPLO_bc_08.pdf)
- [24] LEDAKOWICZ, S., O. PIDUBNIAK. *Analysis of non-stationary temperature field generated by a shaftless screw conveyor heated by Joule–Lenz effect*. In: *Chemical and Process Engineering*. 2021, 42, 119-137. [cit. 23.3.2022]. ISSN 0208-6425. Dostupné z: 10.1016/j.renene.2019.05.088.
- [25] SPIRAJOULE: ELECTRICALLY HEATED SCREW CONVEYOR. [online]. ETIA ECOTECHNOLOGIES. [cit. 26.5.2022]. Dostupné z: [Spirajoule: Electrically heated screw conveyor – Spirajoule \(etia-group.com\)](https://www.etia-group.com/spirajoule)
- [26] COVAS, J. A., A. GASPAR-CUNHA. *Modeling of flow and heat transfer, mixing and morphology development in plasticating single screw extrusion of polymer systems*. 2018 Dept. Polymer Engineering/Institute for Polymer and Composites. University of Minho, Guimaraes, Portugal. 2018. [cit. 20.11.2021]. Dostupné z: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/68719/1/Cap1\\_FINAL.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/68719/1/Cap1_FINAL.pdf)
- [27] NACHENIUS, R.W., T.A. van de WARDT, F. RONSSE, W. PRINS. *Residence time distributions of coarse biomass particles in a Screw conveyor reactor*. In: *Fuel Processing Technology* [online]. 2015, 130, 87-95. [cit. 30.6.2022]. ISSN 0378-3820. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.09.039>.
- [28] XIAOGANG, S., F. RONSSE, J. ROEGIERS, J.G. PIETERS. *3D Eulerian-Eulerian modeling of a Screw reactor for biomass thermomechanical conversion. Part 1: Solids flow dynamics and back-mixing*. In: *Renewable Energy* [online]. 2019, 143, 1465-1476. [cit. 30.6.2022]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.098>.
- [29] RIEGER, F., V. NOVÁK, T. JIROUT. *Hydromechanické procesy II*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03302-3.

- [30] WAJE, S. S., B. N. THORAT, A. S. MUJUMDAR. *An Experimental Study of the Thermal Performance of a Screw Conveyor Dryer*. In: *Drying Technology*. 2006, 24, 293-301. [cit. 10.5.2022]. Dostupné z: DOI: [10.1080/07373930600564506](https://doi.org/10.1080/07373930600564506).
- [31] OSSWALD, T.A., E. BAUR, S. BRINKMANN, K. OBERBACH, E. SCHMACHTENBERG. *International Plastics Handbook*. Munich: Hanser, 2006. ISBN 978-1-56990-399-5.
- [32] NGUYEN-CHUNG, T., K. FRIEDRICH, G. MENNIG. *Processability of Pultrusion Using Natural Fiber and Thermoplastic Matrix*. *Research Letters in Material Science*. 2007, 1-5. [cit. 20.5.2022]. Dostupné z: doi:10.1155/2007/37123
- [33] dos SANTOS, W. N., J. A. de SOUSA, R. GREGORIO. *Thermal conductivity behaviour of polymers around glass transition and crystalline melting temperature*. In: *Polymer Testing*. 2013, 32, 987-994. [cit. 20.5.2022]. ISSN 0142-9418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.05.007>.
- [34] *The Multiple Reference Frame Model*. [online]. ANSYS, Inc, 2009. [cit. 29.5.2022]. Dostupné z: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node370.htm>
- [35] *Sliding Mesh Theory*. [online]. ANSYS, Inc, 2009. [cit. 29.5.2022]. Dostupné z: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node37.htm>
- [36] *Overview and Limitations of the VOF Model*. [online]. ANSYS, Inc, 2009. [cit. 29.5.2022]. Dostupné z: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node298.htm>
- [37] SARGHINI F., A. DE VIVO, F. ERDOGDU. *Analysis of Heat and Momentum Transfer in Screw-Drive Heat Transfer Systems*. In: *Chemical Engineering Transactions* [online]. University of Naples Federico II, Italy, Ankara University, Turkey. 2017, 57. [cit. 20.7.2022]. ISBN 978-88-95608; ISSN 2283-9216.

# Prohlášení

---

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Jakub Lojek, v. r., 9. srpna 2022

*Kuba, J.: Metodický pokyn č. 1/2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, ČVUT v Praze, 1. července 2009, <https://www.cvut.cz/sites/default/files/content/d1dc93cd-5894-4521-b799c7e715d3c59e/cs/20190327-metodicky-pokyn-c-12009-o-dodrzovani-eticky-ch-principu-pripriprave-vysokoskolskych.pdf> [9. srpna 2022]*

# Příloha-Grafy

