ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

TOKOVÉ VLASTNOSTI KOLAGENU A JEJICH MODIFIKACE, JAKO ZÁKLAD TECHNOLOGIE PRO ZPRACOVÁNÍ V POTRAVINÁŘSKÉM PRŮMYSLU

Habilitační práce

Praha, 2019

Jan Skočilas

Poděkování

Rád bych na tomto místě výjádřil poděkování rodině, přátelům a spolupracovníkům za jejich podporu a vstřícnost.

Anotace

Práce se zabývá stanovením tokových vlastností vysokoviskózních materiálů zpracovávaných v potravinářském průmyslu. Obecně jsou diskutovány různé modely a přístupy popisu tokových vlastností nenewtonských látek. Pro praktickou ukázku byla vybrána zpracovatelská technologie výroby umělých střívek z kolagenní hmoty. Tento modelový materiál vykazuje nenewtonské chování a jeho tokové vlastnosti je nutno popsat pro případný návrh zařízení. Tokové vlastnosti byly změřeny různými experimentálními metodami. Dále byla ukázána metoda modifikace tokových vlastností látek elektronovým zářením. Pro měření tokových vlastností byl použit kapilární reometr, zařízení pro radiální vytlačovací tok a rotační reometr. Takto získané vlastnosti jsou použity pro příklad návrhu zařízení. Vybrané zařízení z technologie výroby umělých střívek je kontinuální mísič kolagenní hmoty a barvy. Byla provedena analýza technologie a mechanismů procesů uvnitř zařízení. Zařízení bylo postaveno v poloprovozním měřítku a byly na něm provedeny experimenty. Na základě výsledků simulací a poloprovozních experimentů byl proveden základní konstrukční návrh zařízení splňující požadavky výroby.

Annotation

The assessment of fluid flow properties of the very viscous materials processed in the food industry is provided. In general, various models and approaches of the flow properties description of the non-newtonian fluids are discussed. The technology of the casing production in the food industry was selected for the practical example. The casing is made from the collagen matter. The material exhibits non-newtonian behavior. Flow properties have to be described for design of the processing equipment. Flow properties are measured by various experimental methods. The modification of the flow properties by the irradiation has been shown. Flow properties have been measured by slit rheometer, cone-plate rheometer and by equipment for the squeezing flow. Measured properties were applied for the selected equipment proposal. The equipment serves for the homogenization of the dye in the processed collagen material. The analysis of the technology as well as process mechanisms inside the equipment were described. The pilot scale equipment was manufactured and assembled. Experiments were performed in the pilot equipment. Hypotheses of the design proposal were validated by pilot scale experiments. The flow field of the material in the equipment was investigated by CFD simulation. Based on results of simulations and pilot experiments the basic design of the new equipment was realized.

OBSAH

		Str.
Použité značení		5
1.	**ÚVOD**	10
1.1	Cíl práce	10
2.	**TOKOVÉ VLASTNOSTI NENEWTONSKÝCH LÁTEK**	11
2.1	Reologie	12
3.	**VLASTNOSTI KOLAGENU**	26
3.1	Kolagen	26
3.2	Tok mocninové látky obdélníkovou štěrbinou	29
3.3	Reologické vlastnosti kolagenní hmoty	38
3.3.1	Měření vlastností hmoty vytlačovacím reometrem	38
3.3.2	Měření radiálním vytěsňovacím tokem	54
3.4	Elektrické a tepelné vlastnosti kolagenní hmoty	62
3.5	Změna fyzikálních vlastností kolagenu působením elektromagnetického záření	64
4.	**NÁVRH ZAŘÍZENÍ A ANALÝZA ŘEŠENÍ**	74
4.1	Specifika potravinářského průmyslu	75
4.1.1	Dopravní stroje a zařízení	78
4.1.2	Zpracovatelské stroje a zařízení	83
4.1.3	Stanovení příkonu strojního vybavení	87
4.2	Příklad návrhu zařízení	91
4.2.1	Technologie výroby	91
4.2.2	Stroje a zařízení pro danou technologii	92
4.2.3	Materiálové vlastnosti kolagenu	93
4.2.4	Popis mechanismů procesů uvnitř zařízení	93
4.2.5	Výkon zařízení	94
4.2.6	Poloprovozní experiment	96
4.2.7	CFD model	100
4.2.8	Zjednodušený návrh zařízení	106
5.	**ZÁVĚR**	108
	Použitá literatura	109
	Seznam obrázků	121
	Seznam tabulek	124

POUŽITÉ ZNAČENÍ

Symbol	Název	Rozměr
a	parametr	[-]
a_c	konstanta	[J.kg^{-1}.°C^{-1}]
a_i	konstanta	[Pa]
a_k	konstanta	[S.m^{-1}]
a_s	konstanta	[-]
b	konstanta	[-]
b_c	konstanta	[J.kg^{-1}.°C^{-2}]
b_i	konstanta	[Pa.°C^{-1}]
b_k	konstanta	[S.m^{-1}.°C^{-1}]
c_c	konstanta	[J.kg^{-1}.°C^{-1}]
c_i	parametr	[Pa.Gy^{-1}]
c_k	konstanta	[S.m^{-1}]
c_p	měrná tepelná kapacita	[J.kg^{-1}.K^{-1}]
d	průměr míchadla	[m]
d_c	parametr	[°C^{-2}]
d_i	konstanta	[Pa.s]
d_k	parametr	[°C^{-2}]
e_c	parametr	[°C]
e_i	parametr	[Pa.s.°C^{-1}]
e_k	parametr	[°C]
f	Faningův třecí faktor	[-]
f_a	frekvence zatěžování	[Hz]
f_c	přechodová, mezní frekvence	[s^{-1}]
f_d	funkce	[Pa]
f_e	funkce	[Pa]
f_i	konstanta	[Pa.s.Gy^{-1}]
$\vec{f}_o$	vektor objemových sil	[m.s^{-2}]
f_r	radiální složka vektoru objemových sil	[m.s^{-2}]
g	funkce	[s^{-1}]
h	vzdálenost desek	[m]
k_s	konstanta Metzner-Otto	[-]
n	index toku kapaliny	[-]
m	parametr mocninového modelu	[-]
p	tlak	[Pa]
p_a	atmosférický tlak	[Pa]
p_{exit}	výstupní tlak	[Pa]
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
Δp^*	bezrozměrná tlaková ztráta šneku	[-]
r	poloměr, radiální souřadnice	[m]
t	čas	[s]
t_L	mezera mezi stěnou a lopatkou	[m]

Symbol	Název	Rozměr
u	rychlost	[m.s^{-1}]
$\bar{u}$	střední rychlost proudění	[m.s^{-1}]
$\vec{u}$	vektor rychlosti	[m.s^{-1}]
u_p	rychlost pístu	[m.s^{-1}]
u_r	radiální rychlost	[m.s^{-1}]
u_s	rychlost skluzu na stěně	[m.s^{-1}]
u_z	axiální rychlost	[m.s^{-1}]
u_φ	tangenciální rychlost	[m.s^{-1}]
x	souřadnice kartézského souřadného systému	[m]
y	souřadnice kartézského souřadného systému	[m]
z	souřadnice kartézského souřadného systému	[m]
A	zavedená konstanta	[-]
A_m	konstanta příkonové charakteristiky	[-]
A_p	zavedená konstanta	[Pa]
A_r	konstanta Arheinieovy rovnice	[Pa.s]
B	zavedená konstanta	[-]
B_p	zavedená konstanta	[Pa.m$^{(n+1)}$]
B_r	konstanta Arheinieovy rovnice	[K]
C	geometrická konstanta	[-]
D	průměr potrubí	[m]
D_h	hydraulický průměr	[m]
D_m	průměr míchadla malého zařízení	[m]
D_v	průměr míchadla velkého zařízení	[m]
DI	velikost dávky záření	[Gy]
F	celková síla	[N]
F_E	elongační síla	[N]
F_S	smyková síla	[N]
G	smykový modul pružnosti	[Pa]
G'	elastický modul	[Pa]
G''	ztrátový modul	[Pa]
G^*	komplexní modul	[Pa]
H	výška obdélníkového kanálu, kapiláry	[m]
H_d	vzdálenost mezi rotujícím a stojícím kotoučem	[m]
H_V	počáteční vzdálenost disků vytěsňovacího toku	[m]
K	koeficient konzistence modelu kapaliny	[Pa.s^n]
K_C	konstanta Cross modelu	[s^n]
K_e	parametr mocninového modelu	[Pa^{1-m}]
K_{HB}	korekce Herschel-Bulkley modelu	[-]
L	délka potrubí či kapiláry	[m]
L_L	délka lopatky	[m]
L^*	bezrozměrná délka šneku extrudéru	[-]
M	hmotnost směsi	[kg]
M_D	hmotnost sušiny	[kg]

Symbol	Název	Rozměr
M_g	hmotnost plynu	[kg]
M_l	hmotnost kapaliny	[kg]
N	otáčky míchadla	[s^{-1}]
N_m	otáčky malého zařízení	[s^{-1}]
N_v	otáčky velkého zařízení	[s^{-1}]
N_1	první rozdíl normálových napětí	[Pa]
N_2	druhý rozdíl normálových napětí	[Pa]
O	obvod	[m]
P	příkon zařízení	[W]
$\dot{Q}$	celkový průtok kapaliny	[$m^3.s^{-1}$]
$\dot{Q}_{PL}$	tok mocninové kapaliny	[$m^3.s^{-1}$]
R	větší průměr mezikruhové kapiláry	[m]
R_D	průměr míchadla	[m]
R_g	plynová konstanta	[$J.kg^{-1}.K^{-1}$]
R_p	průměr potrubí	[m]
R_V	průměr disku	[m]
S	průřez, plocha	[m^2]
S_p	plocha pístu	[m^2]
T	termodynamická teplota	[°C, K]
T_L	osová síla v kapiláře	[N]
V	objem	[m^3]
W	šířka štěrbiny, šířka kapiláry	[m]
W_i	transformovaná tlaková ztráta	[Pa]
Z	konstanta	[-]
Z_i	transformovaný průtok	[s^{-1}]

Řecká písmena

Symbol	Název	Rozměr
α	konstanta závisející na typu pracovního členu míchadla	[-]
δ_z	ztrátový úhel	[°]
δ	parametr	[-]
$\vec{\vec{\delta}}$	jednotkový tenzor	[-]
γ	koeficient zahrnující geometrii extrudéru	[-]
$\dot{\gamma}$	rychlost deformace	[s^{-1}]
$\dot{\gamma}_{rz}$	složka rychlosti deformace	[s^{-1}]
$\dot{\gamma}_{eff}$	efektivní smyková rychlost	[s^{-1}]
ε	poměr Reynoldsových čísel	[-]
$\dot{\varepsilon}_{rr}$	elongační rychlost deformace v radiálním směru	[s^{-1}]
$\dot{\varepsilon}_{zz}$	elongační rychlost deformace v axiálním směru	[s^{-1}]
η	zdánlivá viskozita	[Pa.s]
η_0	počáteční dynamická viskozita	[Pa.s]

Symbol	Název	Rozměr
η'	dynamická viskozita viskoelastické látky	[Pa.s]
η_0	počáteční dynamická viskozita	[Pa.s]
η_∞	konečná dynamická viskozita	[Pa.s]
η_p	plastická viskozita	[Pa.s]
φ	úhel	[rad]
κ	poměr poloměrů mezikruží	[-]
κ_e	měrná elektrická vodivost	[S.m^{-1}]
λ	součinitel třecí ztráty	[-]
λ_{rel}	relaxační čas materiálu	[s]
λ_{ret}	retardační čas	[s]
μ	dynamická viskozita	[Pa.s]
ρ	hustota	[kg.m^{-3}]
ρ_l	hustota kapaliny	[kg.m^{-3}]
σ	napětí	[Pa]
$\vec{\vec{\sigma}}$	tenzor celkových napětí	[Pa]
σ_{xx}	normálové napětí ve směru toku kapaliny	[Pa]
σ_{yy}	normálové napětí kolmé na stěny	[Pa]
σ_{zz}	normálové napětí kolmé na σ_{xx} a σ_{yy}	[Pa]
τ	smykové napětí	[Pa]
τ_f	bod toku	[Pa]
τ_{rr}	složka dynamického napětí	[Pa]
τ_{rz}	složka dynamického napětí	[Pa]
$\tau_{r\varphi}$	složka dynamického napětí	[Pa]
τ_w	smykové napětí na stěně	[Pa]
τ_{xy}	složka dynamického napětí	[Pa]
τ_{xx}	složka dynamického napětí	[Pa]
τ_y	mez toku	[Pa]
τ_{yy}	normálová složka dynamického tenzoru napětí	[Pa]
τ_{zz}	normálová složka dynamického tenzoru napětí	[Pa]
$\tau_{\varphi\varphi}$	normálová složka dynamického tenzoru napětí	[Pa]
$\vec{\vec{\tau}}$	tenzor dynamických napětí	[Pa]
ψ_1	první koeficient normálového napětí	[Pa.s^2]
ψ_2	druhý koeficient normálového napětí	[Pa.s^2]
ω	úhlová rychlost	[rad.s^{-1}]
ω_g	relativní hmotnostní podíl plynu v kapalině	[-]
θ	Kozickiho parametr	[-]
$\vec{\vec{\Delta}}$	tenzor rychlosti deformace	[s^{-1}]
$II_{2\Delta}$	druhý invariant tenzoru rychlosti deformace	[s^{-2}]
Γ	zavedená proměnná	[s^{-1}]

Bezrozměrná čísla

Označení	**Název**	**Rozměr**
De	Debořino číslo	[-]
P^*	příkonové číslo pro extrudér	[-]
Po	příkonové číslo	[-]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Re_G	Reynoldsovo číslo pro mocninový model kapaliny	[-]
Re_{GA}	Reynoldsovo číslo – zobecněný tvar	[-]
Re_{GD}	Reynoldsovo číslo dle Delplace	[-]
Re_m	modifikované Reynoldsovo číslo pro mocninovou kapalinu	[-]
Re_{MR}	modifikované Reynoldsovo číslo podle Metznera a Reeda	[-]
Wi	Weissenbergovo číslo	[-]

1. ÚVOD

Při návrhu strojů a zařízení pro potravinářský průmysl mají velký význam znalosti o zpracovávané látce. Typické pro tento průmysl je zpracovávání silně viskózních newtonských a nenewtonských látek, sice obecně známými procesy (čerpání, míchání, vytlačování, atd.) které jsou však vlivem těchto vlastností značně energeticky náročné a komplikované. Procesní inženýr (konstruktér) se musí při návrhu stroje s těmito problémy vyrovnat a navrhnout optimální řešení.

Celá řada potravin a surovin pro jejich přípravu vykazuje nestálost ve svých fyzikálně chemických parametrech jak v čase, tak i prostoru, ačkoliv jsou odebírány z jednoho zdroje. Příčinou tohoto jevu jsou biochemické procesy, které probíhají již při vzniku suroviny. Tyto procesy jsou výrazně ovlivněny okolními podmínkami, např. klimatickými, působením vnějších organismů a mikroorganismů, geografickou polohou, atp.

Silně viskózní látky lze definovat jako kapaliny s různým stupněm tekutosti. Většinou se jedná o kapaliny tvořené homogenními nebo nehomogenními směsmi o různé, často vysoké koncentraci, tj. koncentrované roztoky, emulze, suspenze nebo gel. Tyto látky se vyznačují specifickými požadavky na zpracování vzhledem k požadavku na výslednou strukturu materiálu. Vysoko viskózní materiály dosahují hodnoty zdánlivé či dynamické viskozity (podle typu chování dané látky popsané závislostí smykového napětí na rychlosti deformace) v řádech desítek, často i stovek Pa.s.

K návrhu stroje pro požadovanou aplikaci je nutná znalost základních fyzikálních procesů a pochodů, fyzikálně chemických vlastností látek a jejich vzájemného působení. Mezi tyto vlastnosti patří i znalost reologie produktu, který má být zpracováván.

Předkládaná práce je rozdělena do pěti kapitol, které shrnují základní informace o potravinářských provozech, specializují se na zpracování vysoko viskózních látek, snaží se podat ucelené rozdělení, charakterizaci těchto látek a přehled o jejich důležitých vlastnostech z pohledu zpracování a popisuje detailněji způsoby identifikace těchto parametrů. Zabývá se také použitím standardních experimentálních technik a moderních nástrojů počítačové analýzy pro identifikaci a verifikaci jevů uvnitř zařízení, které není možnO ověřit jiným dostupným způsobem, ať již z hlediska ekonomického či časového. Na základě výsledků těchto šetření lze provést návrh konkrétního zařízení pro požadovanou aplikaci zpracování vysokoviskózní látky – kolagenu.

1.1 CÍL PRÁCE

Cílem práce je stanovení tokových vlastností kolagenní hmoty. Tyto vlasnosti bude možno použít při návrhu stroje pro potravinářský průmysl. Celá práce je orientována na kolagenní hmotu, která se zpracovává v technologii výroby umělých střívek.

Pro zkoumanou kolagenní hmotu je třeba zvolit správný způsob a zařízení pro měření reologických vlastností. S využítím závěrů z experimentů byl proveden návrh vybraného zařízení. Toto zařízení bylo realizováno a proběhla na něm provozní měření.

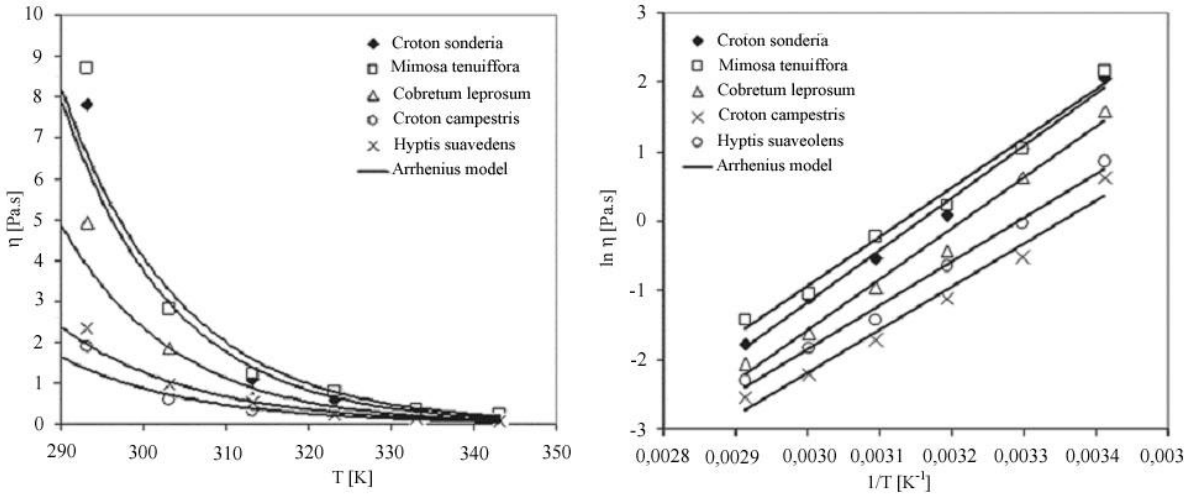
Autor si klade za cíl

1) stanovit tokové vlastnosti kolagenní hmoty různými metodami a přístupy
2) provést návrh vybraného typu zařízení
3) vyhodnotit výsledky experimentů na poloprovozním zařízení a ověřit předpoklady návrhu.

2. TOKOVÉ VLASNOSTI NENEWTONSKÝCH LÁTEK

Hlavním faktorem určujícím návrh zařízení pro dopravu a mechanické zpracování látek s vysokou „viskozitou“ (větší než 10 Pa.s [Macosko, 1994]) jsou jejich tokové vlastnosti. Tyto látky, obzvláště v potravinářském průmyslu, však vykazují spíše nenewtonské chování (než ideální newtonské), tedy výraznou závislost tokových vlastností na režimu toku.

V případě látek newtonských látek se jedná v podstatě o dva fyzikální parametry, hustotu a kinematickou či dynamickou viskozitu. Typickým představitelem těchto potravinářských látek je med, jehož dynamická viskozita se pohybuje řádově 0,03 až 60 Pa.s [Barnes, 1989]. Je třeba zdůraznit, že u medu se projevuje silná závislost viskozity na teplotě a obsažené vlhkosti, což způsobuje nemalý problém při návrhu stroje pro jeho zpracování. Dle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/63/EU ze dne 15. května 2014, jsou kladeny přísné požadavky na složení medu, především obsahu přírodních enzymů, který je v praxi kontrolován měřením obsahu hydroxymethylfururalu (HMF), pro nějž je stanoven limit. Tyto enzymy jsou zničeny zahříváním medu [Dupal, 2015]. Závislost materiálových vlastností medu na provozních parametrech stroje zpracovávajícího med se stává nelineární a tedy obtížně stanovitelná. Dle výše uvedených podmínek je nutné zařízení chladit a teplo, které vzniká viskózním třením v kapalině – medu, je nutno odvést.



Obr. 2-1 Závislost viskozity medu na teplotě. Med z různých druhů květin – původ Brazílie. [Santos, 2014]

Pro popis toku nenewtonských látek samotná hodnota dynamické viskozity (jako fyzikální konstanty) nestačí, neboť je závislá na rychlosti deformace. V tomto případě je nutno tokové vlastnosti látky popsat závislostmi tzv. zdánlivé viskozity, resp. závislosti smykového napětí na rychlosti deformace. Tyto rovnice se nazývají konstitutivní. Závislost může zahrnovat další parametry dle režimu toku (modul pružnosti, resp. ztrátový a dynamický modul, relaxační čas, skluzová rychlost, elongační viskozita, index toku, koeficient konzistence, mez toku, atd.), které je nutno získat vždy experimentálně.

Je třeba poznamenat, že tzv. newtonské chování látky je pouze ideální model popisující lineární závislost mezi zjednodušeně řečeno namáháním a deformací látky, které platí pouze v omezeném rozsahu smykových rychlostí. To samé lze říci o většině čistě viskózních reologických modelů.

Na stroje a zařízení zpracovávající látky s vysokou viskozitou, především pro potravinářský průmysl, je kladena řada požadavků. Pro procesní a mechanický návrh těchto strojů se používají

obecné vztahy s empirickými parametry, charakteru spíše integrální veličiny. Pro hlubší pochopení a popis procesů odehrávajících se v těchto strojích a pro optimalizaci metodiky návrhu jejich konstrukce, je potřeba nalézt nástroj, který přinese teoretický popis interakce mezi zpracovávanou látkou a strojem. Tímto nástrojem je reologie.

2.1 REOLOGIE

Reologie je vědní obor zabývající se působením mechanických vlivů na pevné látky a tekutiny. Mechanická zatížení mají snahu vyvolávat v objektech napětí a deformace. Proto reologie zkoumá vztahy mezi napětím a deformací u pevných látek, resp. vztahy mezi napětím a rychlostí deformace u tekutin. Za autory teoretických základů reologie lze považovat Markuse Reinera a Eugenea Cook Binghama [Sobotka 1981, Barnes 1993, Mezger 2014].

Reologie významně ovlivňuje procesy a výrobní technologie včetně získávání fyzikálních veličin popisujících tokové vlastnosti látek. S její pomocí lze optimalizovat výrobní postupy a zlepšovat vlastnosti finálních výrobků.

Ačkoliv je reologie poměrně mladý vědní obor, obsahově je značně rozsáhlý a její použití ve výrobě a výzkumu je široké. Reologii lze členit na jednotlivá odvětví

- teoretická reologie
- reometrie
- reooptika
- reologické řešení mechanických prvků a soustav
- bioreologie.

Jednou z nejdůležitějších priorit reologie je pochopení a popsání vztahů mezi strukturou, chemickým složením a mechanickými změnami látky. Ve většině případů lze nalézt přímé analytické řešení těchto vztahů lze nalézt jen velice těžko. Proto jsou zaváděny tzv. reologické modely, tj. zjednodušený popis vlastností látek při zatížení, který je z inženýrského hlediska platný a přesný například v omezeném rozsahu deformací, resp. rychlostí deformací. Mezi prvními, kdo zaváděl reologické modely, byl např. William Thomson alias lord Kelvin. Zároveň reologické modely umožňují určitou klasifikaci látek dle jejich reologického chování [Sobotka, 1981].

Dle vyšetřovaného objektu lze reologii členit na

- *makroreologie* – chápe látku jako spojité kontinuum
- *mikroreologie* – snaží se dát do souvislosti reologické chování a strukturu látky včetně vlastností jejích částic nebo složek.

Dle průběhu vyšetřovaných veličin látky lze nalézt

- *lineární závislost* – která vychází z nejjednoduššího popisu a chápání chování látky
- *nelineární závislost* – zahrnující jak nekonstantní fyzikální veličiny vyšetřované látky v prostoru, tak jejich vzájemnou závislost (především mezi napětím a deformací, resp. rychlostí deformace) nebo závislost na parametrech okolí (například teplotě) a zároveň popisuje i nestandardní fyzikální jevy související se strukturou látky, jako je objemová dilatace látky, Weissenbergův efekt nebo Poyntingův efekt
- *transcendentní* (tixotropní/reopektická) závislost – řeší změnu závislosti reologických vlastností látky v čase vlivem například strukturálních změn či chemickými pochody.

Jak již bylo řečeno, reologie se zabývá vyšetřováním působení mechanických vlivů na pevné látky a tekutiny, resp. kapaliny. V řadě případů látek je však složité, ne-li nemožné, najít

rozhraní mezi kapalinou a pevnou látkou, neboť z hlediska reologického chování tyto látky vykazují jak vlastnosti pevných látek, tak kapalin. Touto oblastí se zabývá především teorie viskoelasticity a viskoplasticity. Pro tyto případy Markus Reiner zavádí bezrozměrné kritérium, jehož hodnotou lze rozlišit, zda se jedná o pevnou látku nebo tekutinu (vzhledem k době pozorování). Toto kritérium se nazývá Debořino číslo a představuje bezrozměrný čas, resp. poměr relaxační doby látky a doby „pozorování“ [Sobotka, 1981], viz obr. 2-2. Viskometrické toky představují idealizovaný popis proudění pomocí nejjednodušších geometrií, mezi které patří smykový tok mezi deskami či rotujícími válci, rotační tok mezi kuželovou plochou a deskou nebo axiální tok trubkou. S jejich pomocí lze získat reologické parametry látky, kde chyba mezi ideálním a reálným chováním je minimální, matematické vyjádření výše uvedeného viz např. [Lai, 2010].

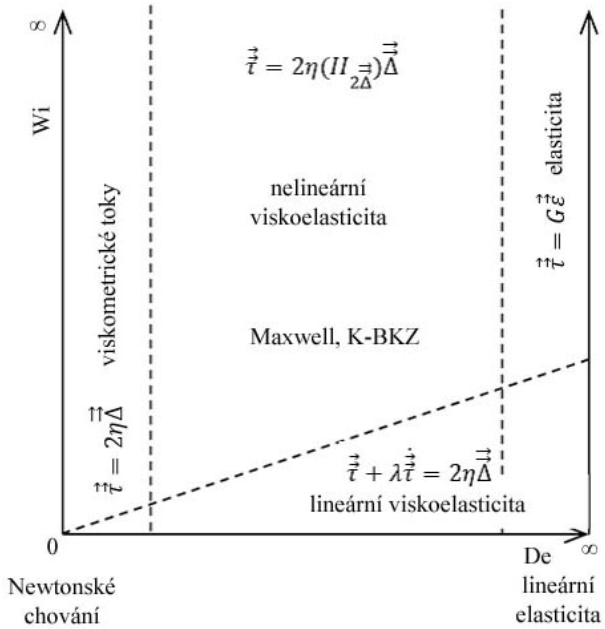
Příkladem možného rozdělení reologického chování látek je uvedeno v tab. 2.1. I v této tabulce je naznačeno, že rozhraní mezi viskoelastickou kapalinou a pevnou látkou není ostré, ale obě oblasti se vzájemně prolínají. V případě potravinářských látek se pohybujeme právě na tomto přechodu. V tab. 2.1 jsou uvedeny názvy modelů, které popisují chování příslušné látky (Newton, Maxwell, Kelvin-Voigt a Hook). Tyto modely obsahují fyzikální parametry, které je nutno získat z experimentálních dat. Reogramy jsou grafické závislosti napětí a rychlosti deformace. Z nich lze například vyčíst dynamickou viskozitu pro newtonskou kapalinu nebo parametry čistě viskózních modelů. Creepové, relaxační a oscilační experimenty slouží pro zjištění viskózních a elastických vlastností látky. V případě creepových testů je látka zatěžována konstantní silou a měří se deformace látky v závislosti na čase. U relaxačních testů je látka deformována konstantní deformací (například prodloužením) a sledují se změna napětí v látce v závislosti na čase. V případě oscilačních testů je látka zatěžována periodicky se opakujícím zatížením nebo deformací a měří se fázový posun odezvy látky na tyto vnější podněty. Hookeův zákon představuje ideální chování elastické látky, kde vztah mezi napětím a deformací je lineární. Platí v oblasti malých deformací a konstantou úměrnosti je modul pružnosti E (Youngův modul).

Tab. 2.1. Přehled reologického chování látek [Mezger, 2014]

Látka	**Tekutina**		**Pevná látka**	
název chování	viskózní (ideální)	viskoelastické	viskoelastické	elastické (ideální)
způsob chování	tok	tok	deformace	deformace
ideální popis (zákon)	Newton	Maxwell	Kelvin-Voigt	Hook
grafická interpretace	reogramy	creepové, relaxační a oscilační testy		

Na obr. 2-2 je uvedena závislost dvou bezrozměrných kritérií, která jsou často zaměňována, protože jsou definována velice podobně, ačkoliv jejich význam není stejný. Proto je nutno je přesně definovat. Jak již bylo uvedeno, Debořino číslo *De*, představuje poměr mezi charakteristickým časem materiálu (často používaný je relaxační čas) a charakteristickým časem procesu deformace materiálu (chápán jako čas pozorování, nebo také čas experimentu). Charakteristický čas si lze představit jako dobu, za kterou se deformovaný materiál obnoví do původního tvaru, po odebrání vnějšího zatížení (a za předpokladu elastické deformace). Charakteristický čas materiálu je pro elastické pevné těleso řídící se Hookeovým zákonem, rovno nekonečnu, zatímco pro newtonskou viskózní kapalinu je roven nule. Charakteristický čas například vody je 10^{-12} s, zatímco pro taveniny polymerů může být tento čas až vteřiny [Barnes, 1989]. Debořino číslo tedy představuje určitou míru elasticity materiálu jako odezvu na přechodnou deformaci. Oproti tomu Weissenbergovo číslo představuje stupeň nebo míru

nelinearity chování viskoelastických materiálů, obzvláště pokud je deformace příliš malá nebo pomalá. Toto číslo, je definováno jako součin charakteristického času materiálu a rychlosti deformace [Dealy, 2010].

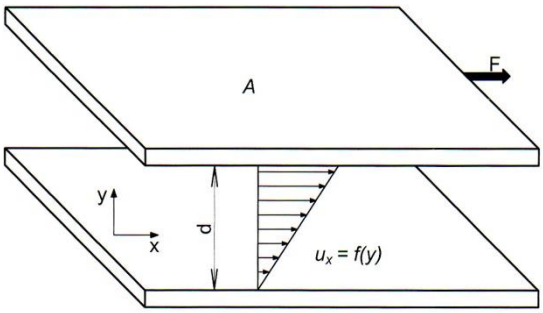


Obr. 2-2 Rozdělení látek na základě hodnot Debořina čísla, tzv. Pipkinův diagram [Phan-Thien, 2013, Nemat-Nasser, 1981, Macosko, 1994]

Debořino číslo je vyjádřeno jako

$$De = \frac{\lambda_{rel}}{t} \tag{2.1}$$

kde λ je relaxační čas materiálu a t je čas pozorování nebo působení deformace,



Obr. 2-3 Smykové proudění mezi dvěma deskami [Barnes, 1989]

Weissenbergovo číslo

$$Wi = \lambda_{rel}\dot{\gamma} \tag{2.2}$$

kde λ_{rel} je relaxační čas materiálu a $\dot{\gamma}$ rychlost deformace. Rychlost deformace je definována jako změna relativní deformace v čase. Podle způsobu namáhání látky je potom definována deformace.

V případě čistě smykového toku (jednotlivé vrstvy kapaliny se po sobě posouvají, vzdálenost vrstev je konstantní, nedochází k deformaci vrstvy, deformace je definována posuvem dvou

sousedních vrstev), viz obr. 2-3, horní deska se pohybuje po vrstvě kapaliny na spodní nehybné desce, je rychlost deformace definována jako časová změna relativního posunu vrstev kapaliny

$$\dot{\gamma} = \frac{du_x}{dy} \tag{2.3}$$

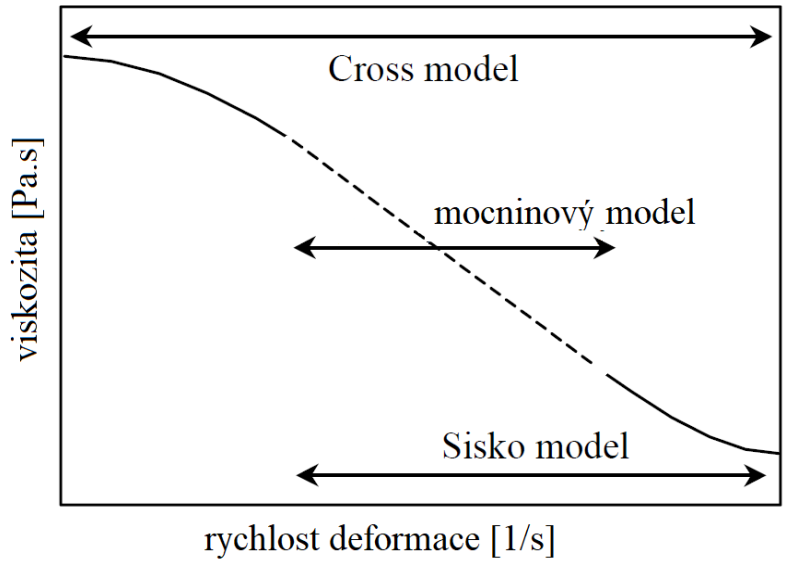
kde $u_x = f(y)$ je rychlost pohybu kapaliny ve směru x a souřadnice y je kolmá na směr proudění.

Uvedené základní rozdělení látek se v převážné většině případů pro inženýrské aplikace zjednodušuje až na úroveň ideálního chování. Pro popis toku se používají dva základní modely, případně jejich kombinace. Smykový tok je pohyb kapaliny, kde elementy se po sobě smýkají a v případě elongačního toku se elementy kapaliny přibližují nebo oddalují.

Nejjednodušším modelem tokového chování látek je newtonův zákon viskozity, který přesně popisuje reologické chování nízkomolekulárních látek a také tavenin polymerů, ale jen při velmi nízkých nebo vysokých rychlostech deformace. Nicméně, ve většině případů je viskozita silně závislá na rychlosti deformace (nebo také na teplotě a čase). Většina odvozených modelů vychází z modelu obecné vazké kapaliny (General Viscous Fluid-GNF), jejíž rovnice je definována následovně pro nestlačitelnou kapalinu [Macosko, 1994]

$$\vec{\vec{\sigma}} = -p\vec{\vec{\delta}} + \eta\left(II_{2\vec{\vec{\Delta}}}\right)2\vec{\vec{\Delta}} \tag{2.4}$$

kde tenzor $\vec{\vec{\sigma}}$ je tenzor celkových napětí, p je izotropní tlak, $\vec{\vec{\delta}}$ je jednotkový tenzor, η představuje zdánlivou viskozitu jako funkci $II_{2\vec{\vec{\Delta}}}$, což je druhý invariant tenzoru rychlosti deformace $\vec{\vec{\Delta}}$. Z tohoto modelu vyšly další teoretické modely, jako například pseudoplastické, plastické či dilatantní kapaliny.



Obr. 2-4 Typické chování viskózní nenewtonské kapaliny (s vnitřní strukturou - polymer, biopolymer), logaritmické měřítko [Barnes, 1989]

Viskozita je též závislá na teplotě. V případě newtonských látek klesá s rostoucí teplotou přibližně podle Arheniova vztahu [Macosko, 1994]

$$\eta = A_r\, e^{\frac{B_r}{T}} \tag{2.5}$$

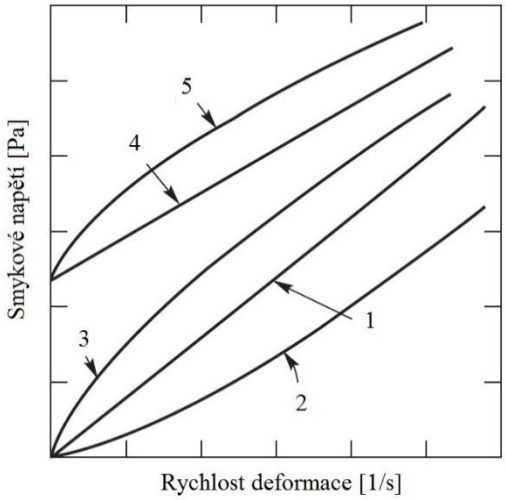
kde A_r a B_r jsou konstanty pro danou kapalinu a T je termodynamická teplota. Konstanta A charakterizuje viskozitu při referenční teplotě a konstanta B reprezentuje poměr volné entalpie a plynové konstanty.

Typické chování viskozity v závislosti na smykové deformaci pro čistě viskózní nenewtonskou látku je uvedeno na obr. 2-4. Pro velmi malé a velmi velké rychlosti deformace vykazuje látka konstantní viskozitu, tedy newtonské chování. Mezi těmito dvěma krajními intervaly lze látku popsat mocninovým modelem. Existuje mnoho modelů popisujících ideální nenewtonské chování kapaliny. Některé z nich, v tomto případě pseudoplastické, jsou popsány na obr. 2-4 a 2-5.

Cross model představuje popis chování v celém rozsahu rychlostí deformace, problémem je většinou stanovit počáteční η_0 a konečnou viskozitu η_∞, kde K_C je konstanta modelu, jejíž rozměr je čas a n je konstanta určující stupeň chování blízký pseudoplastické látce, pokud se blíží nule nebo newtonské látce, pak je rovna jedné [Barnes, 1989].

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + K_C \dot{\gamma}^n} \tag{2.6}$$

V případě vysokých smykových rychlostí a za podmínek, že počáteční viskozita je mnohem větší než konečná $\eta_0 >> \eta_\infty$, zároveň $K_C\dot{\gamma} \gg 1$, a pro většinu pseudoplastických kapalin, je n=1.



Obr. 2-5 Základní modely čistě viskózních kapalin. 1 – newtonská, 2 – dilatantní, 3 – Pseudoplastická, 4 – binghamovská, 5 – Herschel-Bulkley (Sisko) [Chhabra, 1999].

Cross model přejde ve zjednodušenou verzi Binghamova modelu [Barnes, 1989]

$$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_0}{K_C \dot{\gamma}} \tag{2.7}$$

nebo ve známější tvar, kde τ_y je mez toku a η_P plastická viskozita [Barnes, 1989].

$$\tau = \frac{\eta_0}{K_C} + \eta_\infty \dot{\gamma} = \tau_y + \eta_P \dot{\gamma} \tag{2.8}$$

Pro případ, kdy platí, že $\eta_0 >> \eta_\infty$, zároveň $K_C\dot{\gamma} \gg 1$, a η_∞ je malá, přejde Cross model ve známý mocninový model (také nazývaný Ostwald-de Waele) [Barnes, 1989]

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \tag{2.9}$$

kde K je koeficient konzistence a n je index toku.

Pro představu je uvedena tab. 2.2, typických rozsahů rychlostí deformací pro různé druhy zpracovatelských procesů.

Tab. 2.2 Typické rozsahy rychlostí deformace pro různé druhy zpracovatelských procesů [Barnes, 1989]

Proces	**Rychlost deformace [s^{-1}]**	**Příklad**
Usazování částic v kapalině	$10^{-6} – 10^{-3}$	Léky, barvy, salátový dressing
Vytváření tvaru hladiny povrchovým napětím	$10^{-2} – 10^{-1}$	Barvy, inkoust
Ztékání filmu po stěně	$10^{-1} – 10^{1}$	Bělidla, barvy, inkousty
Extrudery	$10^{0} – 10^{2}$	Polymery, potraviny, měkké látky
Žvýkání a polykání	$10^{1} – 10^{2}$	Potraviny
Povlakování v lázni	$10^{1} – 10^{2}$	Barvy, cukrovinky
Míchání	$10^{1} – 10^{3}$	Zpracování kapalin
Tok potrubím	$10^{0} – 10^{3}$	Doprava kapalin, tok krve
Natírání	$10^{3} – 10^{4}$	Barvy
Roztírání	$10^{4} – 10^{5}$	Krém na ruce, pleťová voda
Rychlé povlakování	$10^{4} – 10^{6}$	Výroba papíru
Rozprašování	$10^{5} – 10^{6}$	Atomizace, sušení
Mazání	$10^{4} – 10^{7}$	Ložiska motorů

V případě že index toku je menší než 1, nazývají se tyto kapaliny dilatantními. Typickými představiteli těchto kapalin jsou vodné suspenze škrobu, křemičitanů, případně jiných kulových částic, jako jsou některé písky [Ulbrecht, 1965]. Posledním zmíněným modelem dle obr. 2-4, je Siskův model, který je definován rovnicí [Barnes, 1989]

$$\eta = \eta_{\infty} + K\dot{\gamma}^{n-1} \tag{2.10}$$

Tento model je vhodný pro popis toku emulzí a suspenzí v rozsahu smykových rychlostí od 0,1 do 1000 s^{-1} [Barnes, 1989].

Z obr. 2-4 je zřejmé, že mocninový model (popis ideálního chování) lze použít pro danou látku jen v určitém rozsahu smykových rychlostí. Typické hodnoty parametrů mocninového modelu, tedy koeficient konzistence a index toku, jsou uvedeny v tab. 2.3 pro vybrané látky.

V mnoha případech polotovarů a produktů potravinářského průmyslu nelze jednoznačně charakterizovat, zda je látka kapalinou nebo pevnou substancí, viz tab. 2.1. Látka vykazuje chování jak kapaliny, tak pevné látky, tedy viskoelasticitu. Projevy viskoelastického chování látky je možno sledovat při změnách rychlosti deformace látky a jsou popsány známými jevy „Weissenbergův efekt“ šplhajícího filmu po rotujícím hřídeli míchadla, „Die swell“ nebo také „Barusův efekt“ - expanze extrudovaného profilu v ústí trysky, povrchové efekty při tvarovém

vyfukování (PET lahve) a výrobě fólií jako jsou „efekt pomerančové slupky“ nebo „žraločí kůže“, „tubeles siphon“, tedy volný sifonový efekt a „Kayenův Effect“, vyznačující se vytrysknutím proudu kapaliny z volného povrchu kapaliny, na nějž dopadá druhý proud téže kapaliny [Barnes, 2000, Steffe 1996, Phan-Thien, 2013, Tanner, 1985]. Tyto projevy chování kapaliny jsou znakem nelineární viskoelasticity materiálu, viz obr. 2-6.

Tab. 2.3 Parametry mocninového modelu pro vybrané látky běžného použití [Barnes, 1989]

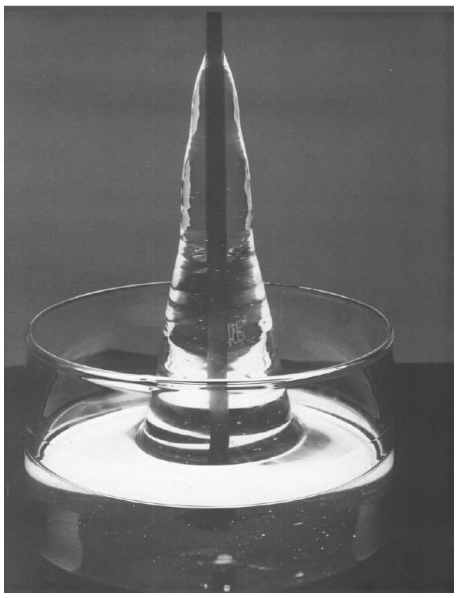
Látka	**Koeficient konzistence**	**Index toku**	**Rozsah smykových rychlostí**
	[Pa.s^n]	**[-]**	**[s^{-1}]**
Inkoust	10	0,85	$10^0 – 10^3$
Gel na praní prádla	10	0,6	$10^0 – 10^2$
Tavenina polymeru	10000	0,6	$10^2 – 10^4$
Tekutá čokoláda	5	0,5	$10^{-1} – 10$
Kloubní maz	0,5	0,4	$10^{-1} – 10^2$
Zubní pasta	300	0,3	$10^0 – 10^2$
Tělové mléko	250	0,1	$10^0 – 10^2$
Gel do vlasů	1000	0,1	$10^{-1} – 10^2$

Kromě zmiňovaného mocninového modelu se pro popis chování potravinářských látek používají modely s mezí toku. Typické hodnoty mezí toku pro různé potraviny udává tab. 2.4.

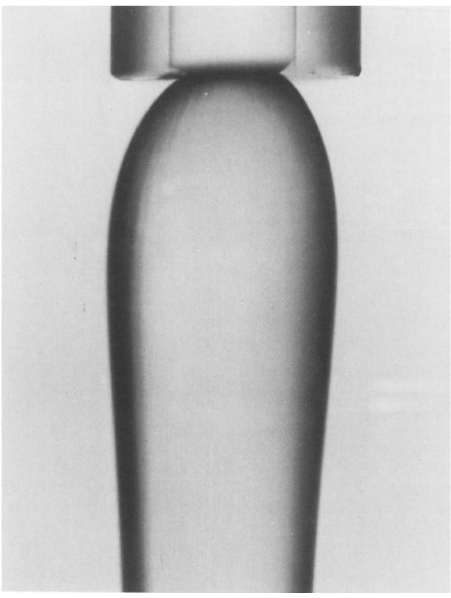
Tab. 2.4 Meze toku vybraných potravinářských látek, orientační hodnoty [Barnes, 2000]

Látka	**Mez toku [Pa]**
Kečup	~15
Špagetová omáčka	~25
Hořčice, jablečná dřeň	~60
Majonéza	~90
Rajčatový protlak	~125

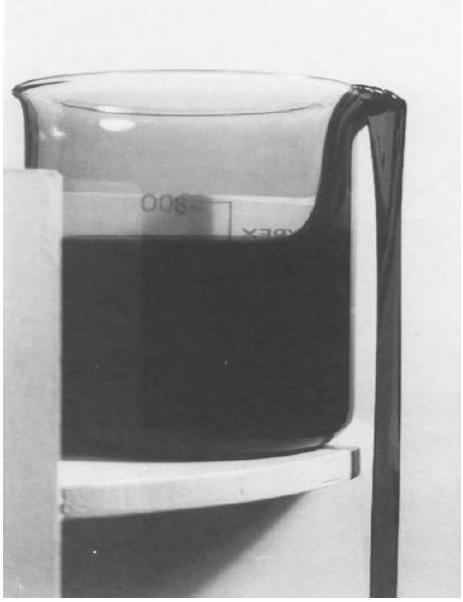
Nicméně, popis tokových vlastností a chování modely nelineární viskoelasticity (kapalina druhého řádu [Bird, 1987 a Larson, 1988], nebo komplikovanějším modelem K-BKZ [Kaye, 1962, Bernstein, 1963] a UCM – upper convective Maxwell model [Larson, 1988]), je velmi složitý a tomuto tématu se věnuje zatím jen málo prací [Steffe, 1996]. Nelineární viskoelasticita se projevuje především při velmi vysokých rychlostech deformace. Existují experimentální metody, např. LAOS – large amplitude oscilatory shear (velké amplitudy smykových deformací, tedy čistě smykový tok), které se orientují z hlediska provozních parametrů experimentu na oblasti velkých deformací a tedy nelineárního chování [Mezger, 2014].



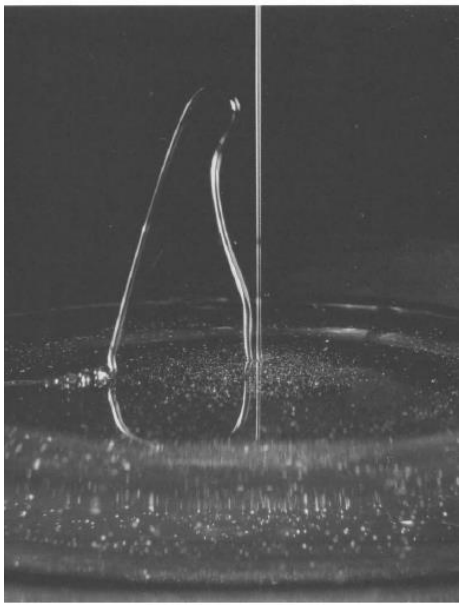
a) Weissenbergův efekt



b) Barusův efekt (Die swell)



c) tubeless siphon effect



d) Kayenův efekt

Obr. 2-6 Projevy viskoelastického chování látky [Boger, 1993]

Viskoelastické chování lze rozdělit na lineární a nelineární, viz obr. 2-2. Drtivá většina potravinářských látek vykazuje viskoelastické chování, přičemž přechod mezi lineární a nelineární viskoelasticitou charakterizuje každou látku, a je třeba jej zjistit experimentálně. Lineární oblast je analogií k Newtonovu zákonu vazkého tření a Hookeovu zákonu, tedy závislost mezi napětím a deformací, resp. rychlostí deformace, je lineární. Nelineární viskoelasticé chování látky lze většinou popsat jen experimentálními daty, a toto vyhodnocení je velice užitečné pro praktické účely, nicméně pro účely teorie mohou tato data posloužit jen pro porovnání látek mezi s sebou [Steffe, 1996].

V oblasti lineární viskelasticity (malé deformace) se pro popis chování těchto látek používají modely založené na mechanické analogii. Dva základní představitelé jsou Maxwell a Kelvin-Voight modely, viz obr. 2-7. Spojují v sobě vlastnosti newtonské kapaliny, charakterizované zdánlivou viskozitou η a pevné látky (dle Hookeova zákona), s materiálovým parametrem –

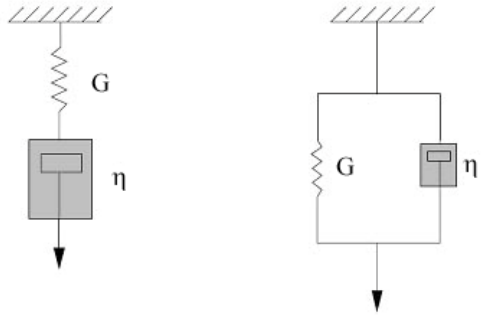
smykovým modulem pružnosti G. Mechanickou analogií těchto látek je kombinace pístového tlumiče (newtonská látka) a vinuté pružiny (dle Hookeova zákona).

Pro Maxwellův model platí, že součet deformací jednotlivých členů se rovná celkové deformaci systému. Pokud hledáme vztah pro rychlost deformace, rovnici pro celkovou deformaci zderivujeme v čase a výsledný tvar Maxwelova modelu je vyjádřen rovnicí [Steffe, 1996], viz obr. 2-7.

$$\tau + \lambda_{rel}\left(\frac{d\tau}{dt}\right) = \eta\dot{\gamma} \tag{2.11}$$

kde λ_{rel} je materiálová konstanta nazývaná relaxační čas nebo charakteristický čas kapaliny (dle Maxwellova modelu). Je definován materiálovými parametry jednotlivých částí modelu [Steffe, 1996], viz obr. 2-7. Tyto parametry lze zjisti z tzv. relaxačního testu.

$$\lambda_{rel} = \frac{\eta}{G} \tag{2.12}$$



a) b)

Obr. 2-7 Modely lineární viskoelasticity, a) Maxwell, b) Kelvin-Voigt [Steffe, 1996]

Pro model Keliv-Voigt platí, že celkové napětí systému je rovno součtu napětí jednotlivých členů, což lze zapsat následující rovnicí po derivaci v čase [Steffe, 1996]

$$\frac{1}{G}\frac{d\tau}{dt} = \dot{\gamma} + \lambda_{ret}\frac{d\dot{\gamma}}{dt} \tag{2.13}$$

kde λ_{ret} je materiálová konstanta nazývaná retardační čas a je definována stejnou rovnicí jako relaxační čas (2.12). Tyto parametry lze získat z tzv. creepového tesu. Materiálové vlastnosti v oblasti vybraných potravin jsou uvedeny v tab. 2.5 a 2.6.

Ačkoliv některé kapaliny nevykazují elasticitu nebo rozdíl normálových napětí, stále mají viskozitu závislou na rychlosti deformace. I pro tyto látky je výhodné používat Weissenbergovo číslo. Ať již elasticita hraje roli, či nikoliv, konstitutivní rovnice popisující závislost mezi viskozitou a smykovým napětím by měla obsahovat parametr s rozměrem času, který by byl použitelný pro výpočet Weissenbergova čísla. Například běžný mocninový model obsahuje parametr – koeficient konzistence, který nemá jednoznačný fyzikální význam a jeho jednotky jsou závislé na druhém parametru – indexu toku.

Tab. 2.5 Smykový modul pružnosti pro některé potraviny [Mezger 2015, Tanner, 2000]

Látka	***G* [Pa]**
Salátový dresink	5-10
Barvy a povlaky	10-50
Krémy, pasty, pleťová voda	50-5000
Pudinky, želatinové bonbony	1000-5000
Medvídci	10^4-$5 \cdot 10^5$
Sýry	10^3-10^6
Voda	10^9

Tab. 2.6 Relaxační čas a počáteční viskozita vybraných látek [Tanner, 2000]

Látka	**Teplota**	**Relaxační čas λ_{rel}**	**Počáteční viskozita η_0**
	[°C]	**[s]**	**[Pa.s]**
Voda	20	10^{-12}	0.001
Minerální olej	30	$7 \cdot 10^{-10}$	0,5
Poly-dimethylsiloxan	30	$1{,}7 \cdot 10^{-4}$	0,3
Poly-dimethylsiloxan	125	10^{-6}	100
LDPE	115	10	$2 \cdot 10^5$
LDPE	240	0,1	3000
HDPE	180	0,07	2000
HDPE	220	0,05	1000
Houževnatý Polystyren	170	7	$2 \cdot 10^5$
Houževnatý Polystyren	210	3	10^5
0,5 % vodný roztok Hydroxyetylen-celulózy	27	0,1	1,3
Sklo	27	$> 10^5$	$> 10^{18}$

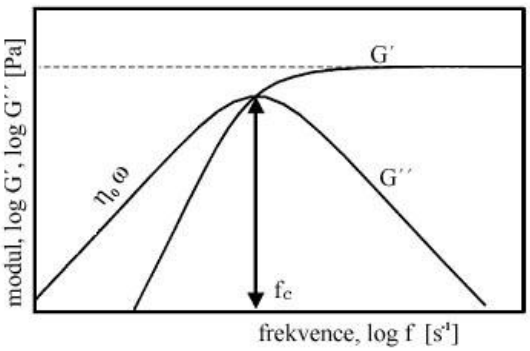
Upravený model (2.14) lze snadno použít pro výpočet Weissenbergova čísla. V tomto modelu je koeficient konzistence nahrazen charakteristickým časem materiálu. Tento charakteristický čas představuje reciprokou hodnotu smykové deformace, v níž je hodnota zdánlivé viskozity rovna počáteční viskozitě η_0 [Dealy, 2010].

Pokud hodnotu počáteční viskozity neznáme, stane se z dvouparametrického modelu model tříparametrický

$$\eta = \eta_0 (\lambda_{rel} \dot{\gamma})^{n-1} \tag{2.14}$$

Jednou z nejčastěji používaných experimentálních metod, kterou lze určit parametry lineární viskoelasticity, jsou oscilační testy. Provádějí se na rotačním reometru nejčastěji v konfiguraci pracovního členu kužel-deska nebo deska-deska. Při měření se sleduje odezva kapaliny na

vstupní oscilační napětí nebo rychlost deformace. V případě creepových a relaxačních testů se jedná o studium chování s časovou závislostí.



Obr. 2-8 Záznam naměřených dat pro kapalinu s Maxwellovým modelem chování [Barnes, 1989]

U oscilačních testů je čas nahrazen frekvencí, kde nízké frekvence jsou použity pro vyšetřování viskózní odezvy, zatímco vysoké frekvence pro odezvy elastické. Z fázového posunu frekvenčního vstupu a výstupu můžeme usuzovat na míru elastického chování kapaliny. Elastická složka kapaliny je charakterizována elastickým modulem *G'* a viskózní složka potom ztrátovým modulem *G''*. Poměr mezi těmito moduly potom vyjadřuje ztrátový úhel, a komplexní modul je kvadratický průměr mezi těmito dvěma moduly. Dnes všechny moderní reometry umožňují oscilační měření, jehož výsledek je závislost elastického a ztrátového modulu na frekvenci. Dynamická viskozita viskoelastické látky [Barnes, 2000]

$$\eta' = \frac{G''}{2\pi f_a} \tag{2.15}$$

ztrátový úhel je vyjádřen takto

$$tg\ \delta_z = \frac{G''}{G'} \tag{2.16}$$

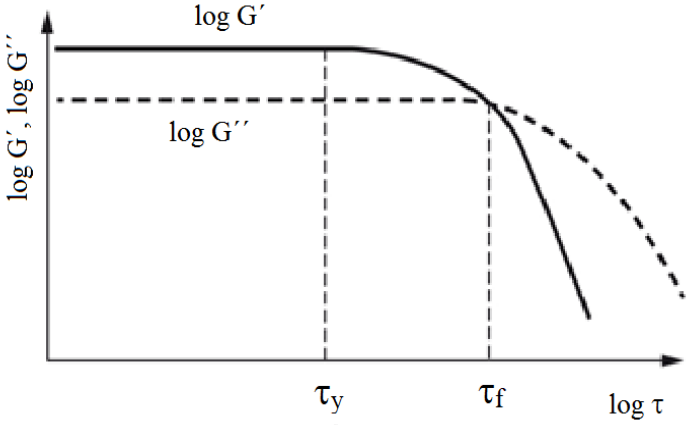
a komplexní modul je definován rovnicí

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \tag{2.17}$$

Pokud se kapalina chová podle Maxwelova modelu, záznam z měření může vypadat například dle obr. 2-8. Z něj lze vyčíst rozsah frekvencí, resp. deformace, kdy se látka chová jako viskoelastická pevná látka *G' > G''* a kdy jako viskoelastická kapalina *G' < G''*. Navíc je zde vyznačen přechod, kdy se chování látky mění z pevného na kapalné vlivem vnějšího zatěžování, čemuž odpovídá mezní (nebo přechodová) frekvence f_c. Z této frekvence lze stanovit relaxační čas λ_{rel} jednoduše výpočtem periody odpovídající frekvenci. Navíc je z grafu možno vyčíst i počáteční viskozitu η_0.

Právě u oscilačních testů lze zjistit, kde se nalézá přechod mezi lineární a nelineární vikoelasticitou. V případě lineární oblasti nejsou moduly *G'* a *G''* závislé na maximální amplitudě nebo napětí oscilačního pohybu [Barnes 1989]. Proto se pro měření používá metoda měnící se amplitudy oscilací (postupně rostoucí a poté klesající) a výsledkem je závislost modulů na napětí nebo smykové deformaci. Na obr. 2-9 je ukázka výsledku měření se změnou amplitudy. Z naměřených hodnot lze vyčíst právě přechod mezi lineární a nelineární oblastí chování látky, kde bod přechodu je také označován jako mez toku τ_y, což je hodnota smykového

napětí na mezi linearity. Dalším důležitým bodem je tzv. bod toku τ_f, což je hodnota smykového napětí, ve kterém mají oba moduly stejnou hodnotu. Pokud bychom zvyšovali smykové napětí, zkoumaný vzorek začne téct, změní se z pevné viskoelastické látky na viskoelastickou kapalinu. Tento bod je označen v obr. 2-8, přechodovou nebo mezní frekvencí f_c. Čím více jsou hodny meze toku a bodu toku blíže k sobě, tím více je látka náchylná ke křehkému lomu [Anton Paar].



Obr. 2-9 Oscilační test s použitím techniky zvětšující se amplitudy, závislost modulů na smykovém napětí, mez toku a bod toku [Anton Paar]

Při toku viskoelastické látky, kdy se projeví výše popsané jevy, jako např. Weissenbergův efekt, hrají významnou roli tzv. viskoelastické síly. Ty jsou důsledkem normálových napětí, které vedle smykových napětí, nejsou nulová. Potom tedy rozložení napětí v tekoucí viskoelastické kapalině lze popsat následujícími rovnicemi [Barnes, 2000]

$$\tau = \eta\dot{\gamma} \tag{2.18}$$

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = N_1 \tag{2.19}$$

$$\sigma_{yy} - \sigma_{zz} = N_2 \tag{2.20}$$

kde N_1 je tzv. první rozdíl normálových napětí, N_2 je tzv. druhý rozdíl normálových napětí, σ_{xx} je normálové napětí ve směru toku kapaliny, σ_{yy} je normálové napětí kolmé na stěny, mezi kterým dochází ke smykovému toku kapaliny a σ_{zz} je normálové napětí kolmé na dvě předchozí, resp. v neutrálním směru [Macosko,1994]. Zdánlivá viskozita, první a druhý rozdíl normálových napětí se nazývají viskometrické funkce. První a druhý rozdíl normálových napětí lze definovat také jako tzv. první a druhý koeficient normálového napětí ψ_1 a ψ_2, zavedený jako viskoelastický ekvivalent k viskozitě [Barnes, 2000]

$$\psi_1 = \frac{N_1}{\dot{\gamma}^2} \tag{2.21}$$

$$\psi_2 = \frac{N_2}{\dot{\gamma}^2} \tag{2.22}$$

Barnes [Barnes, 1987] a Larson [Larson, 1988] poté navrhli konstitutivní model pro viskoelastickou látku, definovaný právě těmito zavedenými veličinami. Model kapaliny druhého řádu je popsán rovnicí

$$\vec{\vec{\sigma}} = -p\vec{\vec{\delta}} + 2\eta_0\vec{\vec{\Delta}} - \psi_1\hat{\vec{\vec{\Delta}}} + 4\psi_2\vec{\vec{\Delta}}\cdot\vec{\vec{\Delta}} \tag{2.23}$$

kde tenzor $\vec{\vec{\sigma}}$ je tenzor celkových napětí, p je izotropní tlak, $\vec{\vec{\delta}}$ je jednotkový tenzor, η_0 představuje zdánlivou viskozitu, $\vec{\vec{\Delta}}$ je tenzor rychlosti deformace a ψ_1, ψ_2 jsou první a druhý koeficient normálových napětí. Tenzor rychlosti deformace představuje symetrickou část tenzoru gradientu rychlosti proudového pole tekutiny a lze jej definovat rovnicí

$$\vec{\vec{\Delta}} = \frac{1}{2}[\nabla\vec{u} + (\nabla\vec{u})^T] \tag{2.24}$$

Horní konvektivní derivace tenzoru rychlosti deformace (pozn. v tomto textu označena stříškou nad danou veličinou) je definována rovnicí

$$\hat{\vec{\vec{\Delta}}} = \frac{\partial}{\partial t}\vec{\vec{\Delta}} + \vec{u}\cdot\nabla\vec{\vec{\Delta}} - (\nabla\vec{u})^T\cdot\vec{\vec{\Delta}} - \vec{\vec{\Delta}}\cdot\nabla\vec{u} \tag{2.25}$$

Asi nejjednodušším způsobem, jak skloubit časovou závislost a reologickou nelinearitu, je nahrazení materiálové derivace horní konvektivní derivací tenzoru dynamických napětí v Maxwelově modelu (2.11) [Oldroyd, 1950)]

$$\vec{\vec{\sigma}} + \lambda_{rel}\hat{\vec{\vec{\sigma}}} = 2\eta_0\vec{\vec{\Delta}} \tag{2.26}$$

Na základě Maxwelova modelu bylo navrženo mnoho modifikací této rovnice s cílem zlepšit predikci modelu, především pro taveniny polymerů a biopolymery. Obecný tvar lze zapsat následující rovnicí [Macosko, 1994]

$$\hat{\vec{\vec{\sigma}}} + f_e\left(\vec{\vec{\sigma}}, \vec{\vec{\Delta}}\right) + \frac{1}{\lambda_{rel}} + f_d\left(\vec{\vec{\sigma}}\right) = 2G\vec{\vec{\Delta}} \tag{2.27}$$

kde nově zavedená funkce různých autorů f_e , která je závislá jak na tenzoru celkových napětí, tak na tenzoru rychlosti deformace, upravuje rychlost vzniku napětí v kapalině, a funkce f_d závislá jen na tenzoru dynamických napětí, která definuje rychlost zániku napětí v kapalině, [White, 1963, 1977; Larson 1984; Leonov, 1976; Phan Thien, 1977, 1978].

Vedle diferenciálních konstitutivních rovnic byly navrženy a odvozeny i rovnice integrální, např. model K-BKZ [Kaye, 1962, Bernstein, 1963], který je dobře použitelný pro většinu tavenin průmyslových polymerů a biopolymery, nebo Lodgeova integrální konstitutivní rovnice, tzv. rovnice Lodgeova, elastické kapaliny [Lodge, 1968]. Dále existují tzv. strukturální modely, které se snaží zahrnout do konstitutivních rovnic i tvar, velikost nebo zapletení a zesíťování makromolekul látky [Dorfmann, 2004 a další].

Shrnutí

Přírodní materiály, a tedy převážná většina potravinářských surovin a produktů, vykazuje nestabilitu vlastností, a to nejen v závislosti na čase (míněno sezónní) a vnějších podmínkách, ale také na parametrech jejich aktuálního procesu zpracování (vnějšího zatěžování), včetně trvání procesu (Deborino číslo). Tento fenomén výrazně ztěžuje návrh zpracovatelského zařízení pro požadovaný materiál a technologii výroby. Proto je nutno chování zpracovávané

látky a změnu jejích parametrů pro požadovaný nebo očekávaný rozsah smykových deformací co nejlépe popsat matematickou závislostí. Ta poslouží k odvození silových interakcí mezi strojem a kapalinou a posléze k pevnostnímu a geometrickému návrhu stroje a jeho částí.

Jak ukazují vlastní experimentální data [Skočilas, 2016] i data z literatury pro stanovení reologického chování, většina potravinářských surovin a produktů vykazuje nenewtoské chování, navíc spojené s viskoelasticitou, která souvisí s vnitřní strukturou látky.

V drtivé většině případů je zařízení navrhováno pro ideální chování látky a stabilní chod, kdy se předpokládá, že při ustáleném toku nejsou viskoelastické efekty významné. Nejméně vhodným (ale nejrychlejším) případem je návrh zařízení pro konstantní „střední“ viskozitu newtonského chování, v lepším případě s dostatečnou rezervou chodu. Běžné řešení je spíše použití některých z modelů čistě viskózních nenewtonských látek s následnou pevnostní kontrolou a kontrolou při rozběhu a zastavení stroje, což již vyžaduje alespoň elementární znalosti z oblasti reologie.

V potravinářském průmyslu, oproti například plastikářskému průmyslu, se povrchové vady výrobku (často způsobené viskoelastickým chováním) nepovažují za zásadní závadu výrobku, důležitější jsou z pohledu zákazníka stabilní senzorické vlastnosti (chuť, aroma, barva, konzistence). Pokud již nastane situace, která způsobí znehodnocení výrobku ve výrobě nebo brzdí zvyšování produkce, nastupuje na řadu empirie hlavního technologa nebo obsluhy stroje.

Z pohledu návrhu stroje dle požadavků provozovatele je konstrukční kancelář časově omezena, a proto při návrhu zařízení používá až drastická zjednodušení tokových vlastností látek a konstrukční řešení odpovídá zkušenostem strojních nebo chemických inženýrů kanceláře. Potravinářský průmysl je existenčně závislý na požadavcích spotřebitele, z čehož vyplývá jeho konzervativní přístup k novým a moderním technologiím. Proto je podporována spolupráce mezi vědeckými institucemi a potravinářským průmyslem (a tedy využití všech oblastí reologie), především v oblasti výzkumu a vývoje zcela nových technologií orientovaných na výrobky s přidanou hodnotou (zachovaní nutriční hodnoty, eliminace alergenu, atd.) nebo v optimalizaci linky (převážně zvyšování produkce), kdy již vlastní znalostní základna podniku není schopna pojmout fyzikální limity procesu výroby.

3. VLASTNOSTI KOLAGENU

Významnou přírodní látkou používanou ve formě suroviny i produktu v potravinářském a farmaceutickém průmyslu je kolagen a jeho denaturovaná podoba želatina. Dle specifikace výsledného produktu se liší způsob jeho zpracování. Kolagen se pro potravinářský a farmaceutický průmysl získává převážně z podkoží hovězího a vepřového dobytka, zřídka se používá kolagen kuřecí nebo rybí. Kolagen je ve větší míře obsažen také v srsti, kostech a rohovině, nicméně extrakce z podkoží je z hlediska technologie zpracování nejsnazší.

Kolagen se nejčastěji používá pro výrobu potravinových doplňků ve formě prášků, tablet, kapslí nebo pórovité houby (lyofilizovaný) a v masném průmyslu pro výrobu jedlých obalů uzenin (párků, salámů, klobás, atd.). Ve větším měřítku se však používá denaturovaný kolagen – želatina. Ta se používá jako potravinářské aditivum pro zahušťování kapalných produktů, nebo jako gelující činidlo. Extrahovaný kolagen se před dalším zpracováním (sušení, mletí, var, rozpouštění, atd.) uchovává ve formě gelu, jehož obsah vody bývá 80 % a více. Voda je vázána v síti zapletených makromolekul a materiál vykazuje jak viskózní, tak elastické chování.

Ačkoliv existuje nespočet prací zabývajících se zkoumáním vlastností kolagenu, stále jsou objevovány a popisovány nové poznatky (i druhy kolagenu) z různých oblastí vědy.

3.1 KOLAGEN

Jednou z nejvýznamnějších makromolekulárních látek přírodního charakteru tzv. biopolymerů, jsou bílkoviny. Jsou základním stavebním kamenem živých organismů a ve skupině organických dusíkatých sloučenin patří mezi ty nejsložitější. Pokud lze bílkoviny dělit, lze je klasifikovat na základě různých vlastností [Blažej, 1978]

a) chemického složení,
b) prostorového uspořádání molekul,
c) funkce v živém organismu,
d) rozpustnosti za definovaných podmínek,
e) charakteristických znaků jejich terciální struktury.

Některé bílkoviny jsou tvořeny jen základními stavebními jednotkami (aminokyselinami), jiné pak vazbou na ostatní složky. Z hlediska molekulové topologie lze hovořit o bílkovinách [Blažej, 1978]

a) jednoduchých – proteinech
b) složených – proteidech.

Podle tvaru makromolekuly potom složení bílkoviny můžeme dělit na [Blažej, 1978]

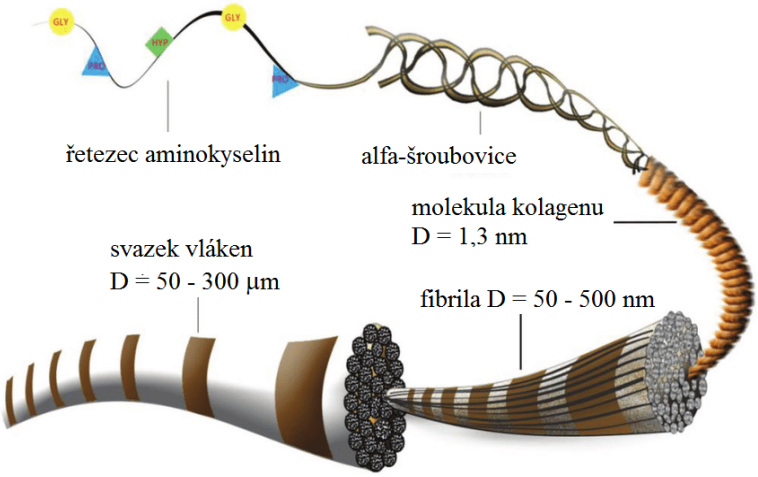
a) globulární
b) vláknité.

Nicméně, pojmy jako kolagen, elastin nebo fibrinogen spíše označují kategorii bílkoviny než čistou chemickou látku. Proto je nutné dodat k danému označení bílkoviny i údaj o zdroji, ze kterého byla izolována [Blažej, 1978].

Kolagen je přírodní látka obsažená v téměř v každém živočichovi, jejímž výzkumem se zabývá mnoho prací a publikací, a to především vzhledem k technickoinženýrským aplikacím ve farmaceutickém a potravinářském průmyslu, stejně jako v medicínské oblasti. Rozsah znalostí, především na molekulární a chemické úrovni, je vcelku rozsáhlý. Proto bude popis této

kategorie bílkoviny omezen spíše na základní přehled faktů potřebných pro pochopení struktury a chování kolagenu z technickoinženýrského hlediska.

Kolagen je základní stavební součást pojivových tkání především kostí, chrupavek, šlach, kůže, zubů, očních orgánů nebo srsti. V současnosti je identifikováno téměř 30 druhů kolagenu (liší se strukturálním uspořádáním aminokyselin). Nejvýznamnější z hlediska zpracování v potravinářském a farmaceutickém průmyslu jsou typy kolagenu I (90% zastoupení ze všech typů kolagenu, kosti, šlachy, kůže), kolagenu II (chrupavky), kolagenu III (cévní stěny) a kolagenu IV (vrstva obalující epitelovou tkáň) [Fratzl, 2007].



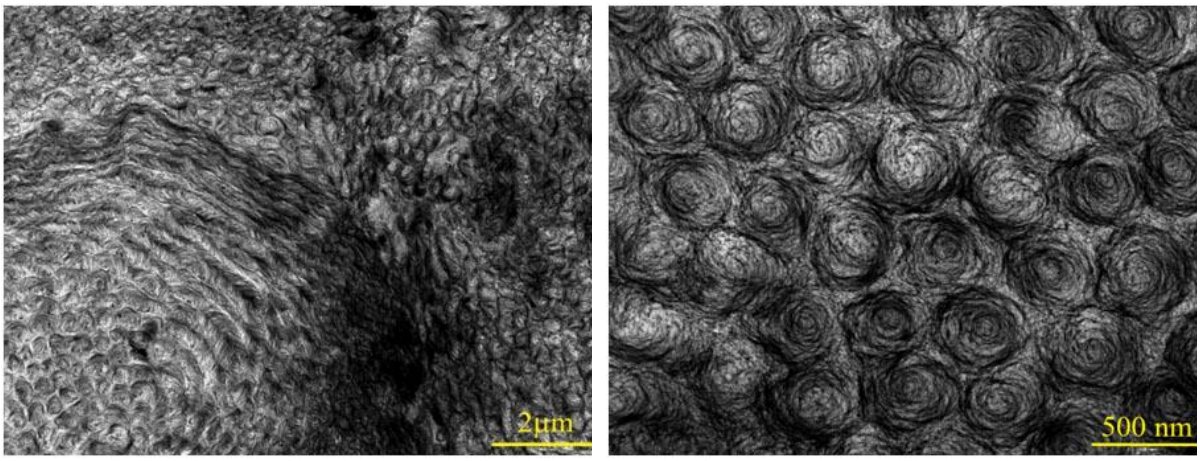
Obr. 3-1 Struktura kolagenového vlákna [Lin, 2019; Fratzl, 2007]

Struktura kolagenu, stejně jako každé bílkoviny, má 4 úrovně, obr. 3-1: primární, sekundární, terciální a kvartérní jednotky. Primárná struktura představuje řetězce aminokyselin spojených peptidovou vazbou. Sekundární struktura je tvořena prostorovým uspořádáním hlavního řetězce (primární struktury) do levotočivé šroubovice. Charakteristickým rysem kolagenu je průměr sekundárního řetězce, který je přibližně 300 nm [Fratzl, 2008, Shoulders, 2009], délka jednoho závitu 1 nm a úhel stoupání 30° [Blažej, 1978]. Šroubovice sekundární struktury je symetrická kolem osy terciální struktury, nikoliv kolem vlastní osy. Terciální struktura, neboli tropokolagen, je složena ze tří sekundárních řetězců se společnou podélnou osou, jejíž průměr je přibližně 2 nm a směr stoupání (troj)šroubovice je pravotočivý. Kvartérní struktura je složena z mnoha terciálních struktur tvořících svazek, tedy kolagenní vlákno, jehož průměr je v rozmezí 50-500 nm [Fratzl, 2008] a délka 0,05 až 1 mm [Silver, 2006].

Na obr. 3-2 jsou fotografie řezu typického vzorku hovězího kolagenu, na kterém byly provedeny veškeré experimenty v této práci. Fotografie byly pořízeny na skenovacím elektronovém mikroskopu, po patřičné úpravě vzorku pro daný typ záznamu. Na obr. 3-2 a) jsou viditelná jednotlivá vlákna a část svazku vláken – kvartérní struktura. Část vláken vzhledem k jejich orientaci směřuje kolmo k řezu vzorku a malá část je s řezem rovnoběžná. Obr. 3-2 b) představuje detailní záběr části obr. 3-2 a), kde je možno nalézt kruhové objekty o průměru 300 až 400 nm, vlákna kolagenu-terciální strukturu.

Kolagen je nerozpustný ve vodě. Elastický modul kolagenního vlákna je od 4 do 8 GPa [Silver, 2004]. Pevnost v tahu materiálu, který obsahuje jen vlákna kolagenu, se pohybuje v rozmezí 100 až 500 $N.mm^{-2}$, pevnost šlach dospělého člověka je 50 až 100 $N.mm^{-2}$ a pevnost lidské kůže dospělého jedince je 16 $N.mm^{-2}$ [Rollhauser, 1950].

Kolagen, podobně jako všechny makromolekulární materiály, je viskoelastický. Jeho fyzikální vlastnosti lze ovlivnit (a řídit) například ozařováním elektronovým zářením nebo přidáním zesíťovacích aditiv.



a) b)

Obr. 3-2 Snímek pořízený elektronovým mikroskopem, a) měřítko 2 μm, b) detail, měřítko 500 nm, vlákna hovězího kolagenu [Nebesářová, 2016]

Reologické modely, které se používají k popisu mechanické odezvy kolagenní látky, musí být navrženy s ohledem na dominantní chování materiálu. Ve vysoce ozářených a koncentrovaných vzorcích převažuje elasticita [Landfeld, Skočilas, et al 2016]. Pro popis elasticity se používají buď strukturální modely založené na statistické mechanice polymerních řetězců, nebo fenomenologické modely operující s deformační energií. Nejjednodušší je tzv. Neo-Hook model elastické pevné látky [Treloar, 2005]. Modely [Arruda, 1993; Boyce, 2000] pro izotropní a [Bischoff, 2002] pro anizotropní materiály jsou schopné popsat velké deformace typické pro všechny elastické makromolekulární látky. Nevratné děje (poškození, plasticita, tečení a relaxace napětí) lze zahrnout do této třídy elastických modelů prostřednictvím interních proměnných charakterizujících míru poškození [Holzapfel, 2000]. Tento přístup je v současné době úspěšně využíván v biomechanice měkkých tkání a v mechanice elastomerů [Dorfmann, 2004, 2012; Weisbecker, 2012], Fungova kvazi-lineární viskoelasticita [Fung, 1993].

Pro popis tekoucích materiálů jsou nejjednodušší modely GNF (Generalized Newton Fluids), jejichž parametry lze snadno stanovit z jednoduchých smykových toků (z reogramů). Tixotropní kapaliny lze také považovat za GNF, ale s interními parametry, které popisují vratné či nevratné časové změny struktury [Tian, 2016], tixotropie kolagenních roztoků je zmiňována až v poslední době [Yang, 2018]. Modely GNF však nejsou schopny vysvětlit některé viskoelastické vlastnosti typické pro polymery, např. rozdíly normálových napětí, relaxaci, a efekty spojené s extruzí [Migler, 2002]. Pro popis těchto jevů se používají fenomenologické diferenciální a integrální modely [Tanner, 1985; Larson, 1988]. Příkladem jsou diferenciální modely Maxwellova typu s mnoha mutacemi [Barnes, 1992]. Integrální modely jsou reprezentovány skupinou modelů BKZ [Leonov, 1994]. Příkladem strukturního modelu je model Pom Pom [McLeish, 1997] a jeho modifikace [Zatloukal, 2003].

Nejčastěji používané modely jsou implementovány i v komerčně dostupných MKP programech, např. ANSYS Polyflow umožňuje volbu osmi diferenciálních a dvou integrálních modelů. Všechny tyto modely se používají pro popis polymerních tavenin a těsta [Lefebvre, 2006; Phan-Thien, 1998; Tanner, 2008].

Například právě těsto je materiál s podobnou konzistencí, jakou má vysoce koncentrovaná kolagenní hmota. Popis reologických vlastností samotné kolagenní hmoty se omezuje převážně jen na modely GNF (Herschel Bulkley) a na lineární viskoelasticitu. Reologické vlastnosti kolagenní hmoty byly např. vyhodnocovány z experimentů s vytlačovacím reometrem při vysokých rychlostech deformace (10^3 s^{-1}) [Skočilas, 2016], oscilačním reometrem při malých

deformacích (do 4 %) [Landfeld, Skočilas, et al 2016], při radiálním vytlačovacím toku mezi dvěma deskami [Landfeld, Skočilas, et al 2015].

Pro popis těchto experimentů byly vyvinuty matematické modely, které respektují specifika testované kolagenové hmoty (pseudostlačitelnost při extruzi, skluz na stěně) a modely tixotropního chování [Žitný, Skočilas, et al 2015]. Byly také učiněny pokusy numericky vyřešit tok White Metznerovy viskoelastické kapaliny konvergentními a divergentními štěrbinovými geometriemi pomocí OPENFOAMu [Kysela, Skočilas, et al 2016].

Reologické experimenty nedávají přímé informace o struktuře a složení kolagenní hmoty (je obtížné zjistit i koncentraci strukturní vody, kterou nelze vymrazit [Lewitzki, 2004]). Je obtížné získat od výrobců bližší informace o jeho složení z důvodu utajení. Více informací bývá k dispozici o fyzikálně chemických vlastnostech (např. molekulární hmotnosti, denaturační teplotě, CD spektru) [Zhang, 2006]. Náhled do struktury umožňují optické metody (FIB – flow induced birefringence) [Bogaerds, 1999], světelná a atomová mikroskopie, SANS (small angle neutron scattering) [Graham, 2008], NMR (nuclear magnetic resonance), AFM (Atomic Force Microscopy), přehled těchto metod uvádí [Verdier, 2009].

Informací o elektrických vlastnostech kolagenu je poměrně málo a jsou zaměřeny hlavně na elektrospinning, dielektrické a piezoelektrické vlastnosti [Anderson, 1968]. Dielektrické vlastnosti Achillovy šlachy (85 % čistého kolagenu) byly měřeny v rozsahu frekvencí 100 Hz až 100 kHz [Tomaselli, 1973]. Autoři [Shrivastav, 2013] testovali rybí kolagen v rozsahu frekvencí 1Hz do 10 MHz a teplot 30 až 150 °C. Autoři [Fathima, 2010] použili dielektrickou spektroskopii pro studium příčných vazeb (crosslink) kolagenu [Marzec, 2008]. Vlivu mechanické deformace na dielektrické vlastnosti kolagenní hmoty se věnuje [Li, 2011]. Menší pozornost než dielektrickým charakteristikám, je věnována elektrické vodivosti. Ze starších prací stojí za pozornost studium iontové a protonové vodivosti Achillovy šlachy při různých koncentracích vody [Bardelmeyer, 1973]. Autoři [Gauza, 2011; Marianiova, 1993] uvádějí specifickou vodivost rybího kolagenu menší než 10^{-6} $S.m^{-1}$, což ovšem odpovídá čistému kolagenu. Přítomnost iontů dle experimentů autora této práce [Štancl, 2017] zvyšuje vodivost kolagenní hmoty až na 0,2 $S.m^{-1}$. Souhrnně vzato, souvislost mezi elektrickými vlastnostmi a deformací není příliš systematicky studována a možná ani neexistuje.

Z vlastního výzkumu autora této práce kolagenní bovinní hmoty vzešlo několik zajímavých skutečností, které budou uvedeny detailněji dále v textu [Skočilas, 2016]. Při vyhodnocování experimentálních dat toku kolagenního těsta popsaného jednoduchým mocninovým modelem, vzešla komplexní inženýrská rovnice pro stanovení třecích ztrát mocninové kapaliny při laminárním proudění v nekruhovém kanále. Parametry mocninového modelu v závislosti na koncentraci sušiny v kolagenní hmotě byly získány dlouhodobými experimenty. Autor provedl návrh měřicího zařízení, jeho výroby, sestavení a posléze oživení systému měření a regulace vybavené vlastním programem jak pro kalibraci, záznam a zpracování dat, tak v případě post-procesingu, programem s filtrováním dat, rozšířeným reologickým modelem a regresním a optimalizačním algoritmem.

3.2 TOK MOCNINOVÉ LÁTKY OBDÉLNÍKOVOU ŠTĚRBINOU

Z experimentů toku kolagenní hmoty v obdélníkové kapiláře vzešly zajímavé závislosti, na základě kterých jsem navrhl a odvodil jednoduchou inženýrskou rovnici pro výpočet třecí ztráty toku pseudoplastické kapaliny v obdélníkovém kanále.

Inženýrský návrh zařízení pro dopravu tekutin vychází z výpočtu tlakové ztráty dle požadovaného průtoku. Nejjednodušší a nejčastější geometrií průřezu potrubí je kruh. Pro

výpočet třecího součinitele proudění newtonské kapaliny v režimu laminárního toku v kruhovém kanále existuje jednoduchý vztah [Chhabra, 1999]

$$f = \frac{16}{Re} = \frac{\lambda}{4} \tag{3.1}$$

kde λ je součinitel třecí ztráty, Re je Reynoldsovo číslo a f je Fanningův třecí součinitel používaný v anglosaské odborné literatuře.

V případě plně vyvinutého laminárního toku kapaliny popsané mocninovým modelem v kruhovém potrubí odvodil Metzner [Metzner, 1955] závislost mezi třecím faktorem a geometrickou konstantou, uvedený v následující rovnici

$$f Re_{MR} = 16 \tag{3.2}$$

Pro vztah však bylo použito modifikované Reynoldsovo číslo, které Metzner a Reed definovali takto

$$Re_{MR} = \frac{2^{3-n} \rho \bar{u}^{2-n} D^n}{K \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n} \tag{3.3}$$

Veličiny použité pro výpočet modifikovaného Reynoldsova čísla jsou podobné jako pro newtonskou kapaliny, tedy D je průměr potrubí, ρ je hustota kapaliny a $\bar{u}$ je střední objemová rychlost kapaliny v proudovodu, navíc se zde objevují parametry mocninového modelu.

Pro výpočet třecího součinitele pro laminární režim proudění mocninové kapaliny v obdélníkové štěrbině existuje semi-empirická metoda [Kozicki, 1966], založená na integrálním modelu toku kapaliny s parametry definovanými regresním modelem experimentálních dat. Tato metoda se používá pro její relativní jednoduchost dosud. V drtivé většině případů dopravy mocninové kapaliny potrubním systémem je tok kapaliny laminární, vzhledem k vysoké zdánlivé viskozitě materiálu.

Vedle výše uvedené metody byla napsána řada prací, které se také zabývají laminárním tokem nenewtonské látky v obdélníkovém potrubí. Jejich autoři používají analytické metody, semi-empirické, numerické a jejich kombinace [Harnett, 1985; Miller, 1972; Mitsuishi, 1969; Muzychka, 2008; Park, 2003].

Pro plně vyvinuté laminární proudění nenewtonské láky, popsané mocninovým modelem v obdélníkovém kanále, lze nalézt jednoduchý vztah výpočtu třecího součinitele s velmi dobrou shodou v porovnání s dosud konvenčními metodami inženýrských výpočtů. Pro popis mnou navržené metody je nejprve nutno definovat základy výpočtu a použité předpoklady.

Fanningův třecí součinitel lze pro laminární plně vyvinutý tok newtonské nestlačitelné kapaliny v obdélníkovém kanále stanovit z rovnice

$$f\ Re = C \tag{3.4}$$

kde f je Fanningův třecí faktor, Re je Reynoldsovo číslo definované pro newtonskou kapalinu a C je geometrická konstanta, která je závislá pouze na poměru stran obdélníkového kanálu. Rovnici (3.4), stejně jako hodnoty parametru C, dnes udává každá odborná literatura zabývající se hydrodynamikou a inženýrským návrhem potrubních sítí. Hodnoty tohoto parametru lze získat experimentálně [White, 1986], nebo analyticky [Rieger, 1973].

Chování nenewtonské kapaliny popsané mocninovým modelem je definováno rovnicí (3.5), která udává vzájemný vztah smykového napětí a smykové rychlosti (nebo také rychlosti deformace), ve kterém figurují dva materiálové parametry (platí pro $\dot{\gamma} > 0$)

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \tag{3.5}$$

Koeficient konzistence *K* představuje hodnotu dynamické viskozity v případě, že by index toku kapaliny *n* byl roven jedné (v tom případě by se jednalo o newtonskou kapalinu). Kapaliny popsané mocninovým modelem se dále dělí na pseudoplastické, kdy index toku je menší než 1 ($0 < n < 1$), v tom případě zdánlivá viskozita klesá s rostoucí rychlostí deformace. Druhou méně častou skupinou jsou kapaliny dilatantní, s indexem toku větším než jedna ($n > 1$), kde zdánlivá viskozita s rychlostí deformace roste až k nekonečnu.

Odvození analytického řešení vztahu pro třecí součinitel pro plně vyvinutý laminární tok nenewtonské kapaliny v nekruhovém průřezu je velice těžké získat z důvodů silné nelinearity v parciálních diferenciálních rovnicích, popisujících tok takovéto kapaliny. Přesto existuje několik prací, které se o odvození více či méně úspěšně pokoušejí použitím numerických nebo aproximačních metod [Mitsuishi, 1969, Crespi-Llorens, 2015]. Pro praktické, resp. inženýrské použití, jsou však tyto rovnice nevhodné.

Kozicky [Kozicki, 1966] navrhnul obecnou formulaci Reynoldsova čísla pro mocninový model kapaliny, v níž byl součinitel tření odvozen z Rabinoson-Moneey rovnice, kde je závislost třecího součinitele na obecné formulaci Reynoldsova čísla pro mocninový model totožná s rovnicí (3.2) a Reynoldsovo číslo je definováno jako

$$Re_G = \frac{2^{3-n}\rho\bar{u}^{2-n}D_h^n}{K\left(b + \frac{a}{n}\right)^n} \tag{3.6}$$

Parametry *a* a *b* rovnice (3.6) představují geometrické konstanty, které jsou tabelovány a lze je stanovit z odpovídající geometrie pro proudění newtonské kapaliny. Toto zobecněné Reynoldsovo číslo odpovídá Reynoldsově číslu navrženému Metzner-Reed v rovnici (3.3), pokud konstanty rovnice (3.6) jsou rovny $a = 0{,}25$ a $b = 0{,}75$. Parametr D_h je hydraulický průměr nekruhového potrubí. Hodnoty parametrů *a* a *b* lze nalézt např. v [Chhabra 1999], viz tab. 3.1. Pro newtonskou kapalinu přejde vztah (3.4) na tvar

$$fRe = 16(a + b) \tag{3.7}$$

Autoři Harnett et. al. [Harnett, 1985] provedli experiment s viskoelastickou kapalinou v obdélníkovém kanále s poměrem stran rovným 0,5 a v následujícím roce experimenty rozšířili [Harnett, 1986] na větší rozsah poměru stran obdélníkového kanálu, kterým protéká kapalina popsaná mocninovým modelem při plně vyvinutém laminárním proudění. Experimentálně stanovili třecí součinitel v takto definované geometrii a v porovnání s rovnicí (3.4) došli k výborné shodě.

Delplace [Delpalce, 1995] ve snaze zjednodušit inženýrský výpočet třecího součinitele zjednodušil zobecněné Reynoldsovo číslo navržené Kozickim. Snížil počet parametrů modelu *a*, *b* na jediný θ

$$Re_{GD} = \frac{\rho \bar{u}^{n-2} D_h^n}{\left(\frac{C}{2}\right)^{n-1} K \left[\frac{24n + \frac{C}{2}}{\left(24 + \frac{C}{\theta}\right) n}\right]^n} \tag{3.8}$$

Všechny výše uvedené metody se používají v inženýrské praxi, asi nejčastěji Kozickiho metoda s použitím dvou tabelovaných parametrů, nicméně pro rychlé výpočty či algoritmizaci nejsou nevhodnější. V rámci inženýrského výpočtu toku kapaliny popsaného mocninovým modelem v potrubí obdélníkového průřezu a následného hlubšího zkoumání výsledků a použitých rovnic, včetně citlivostní analýzy, byla zjištěna zajímavá matematická závislost [Ayas, Skočilas, et al 2019], na jejímž základě byla odvozena jednoduchá inženýrská rovnice pro výpočet třecího součinitele, vyhovující inženýrským požadavků, která zároveň predikovala výsledky ve výborné shodě s dosavadními publikovanými experimentálními daty, včetně dat použitých pro odvození Kozickiho metody.

Tab. 3.1 Hodnoty geometrických parametrů *a*, *b* pro nenewtonskou kapalinu v obdélníkovém potrubí z [Chhabra 1999] a parametr *C* pro newtonskou kapalinu v obdélníkovém potrubí z [White, 1986]. *H* je výška obdélníkového profilu a *W* je jeho šířka.

H/W	***a***	***b***	***C***
[m/m]	**[-]**	**[-]**	**[-]**
0	0,5	1	24
0,05	0,4535	0,9513	22,477
0,1	0,4132	0,9098	21,168
0,2	0,3475	0,8444	19,070
0,25	0,3212	0,8183	18,232
0,3	0,2991	0,7954	17,512
0,4	0,2659	0,7571	16,368
0,5	0,2439	0,7278	15,547
0,6	0,2297	0,7065	14,979
0,7	0,2208	0,6921	14,606
0,75	0,2178	0,6870	14,477
0,8	0,2155	0,6831	14,378
0,9	0,2129	0,6785	14,262
1	0,2121	0,6771	14,227

Parametry *a* a *b* v rovnici (3.6) mohou být jednoduše eliminovány použitím Reynoldsova čísla stanoveného podle Metzner-Reed Re_{MR} (3.3). Pouze místo prostého průměru se použije hydraulický průměr stejně jako v případě Reynoldsova čísla pro laminární tok newtonské kapaliny v nekruhovém průřezu.

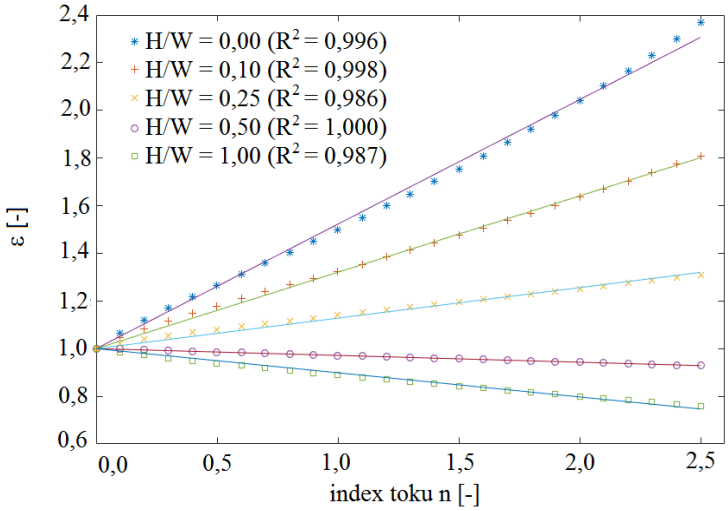
$$Re_{MR} = \frac{2^{3-n}\rho\bar{u}^{2-n}D_h^n}{K\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n} \tag{3.9}$$

Poté je nutné nalézt správný vztah pro součin $f.Re_{MR}$ stejně jako u rovnice (3.2). Standardním postupem je nejprve stanovit vztah mezi Re_{MR} a Re_G, vyjádřený jako poměr rovnic (3.9) a (3.6)

$$\varepsilon = \frac{Re_{MR}}{Re_G} = \left[\frac{4(a+bn)}{3n+1}\right]^n \tag{3.10}$$

Z matematického pohledu je poměr ε mocnitel racionální funkce (3.10) a závisí pouze na poměru stran obdélníkového průřezu potrubí a indexu toku kapaliny n. Reciproká hodnota ε byla definována v práci [Kostic, 1984], jako rozšířená geometrická funkce mocninových kapalin.

Pokud vykreslíme závislost mezi ε a indexem toku kapaliny za předpokladu plně vyvinutého laminárního toku kapaliny, zjistíme, že tato závislost je pro pseudoplastické kapaliny lineární ($0 < n < 1$). Navíc, pokud bychom rozšířili rozsah hodnot indexu toku i pro dilatantní kapaliny, je možno uvažovat lineární závislost mezi ε a n až do hodnoty indexu toku 2, viz obr. 3-3.



Obr. 3-3 Závislost ε na poměru stran obdélníkového kanálu a indexu toku, včetně vyčísleného koeficientu determinace, index toku 0-1 odpovídá látce pseudoplastické, 1 odpovídá newtonské látce a 1-2 látce dilatantní [Ayas, Skočilas, 2019].

Body na obr. 3-3 byly získány výpočtem rovnice (3.10), do níž se za konstanty a a b dosadily hodnoty z tab. 3.1. Tyto hodnoty konstant vychází z mnoha experimentálních šetření [White, 1986]. Z Proložení bodů rovnice (3.10) regresní lineární funkcí je zřejmé, že pro rozsah poměru stran 0 až 1 (kde nula odpovídá nekonečně širokému kanálu, resp. dvěma neomezeným deskám a jednička odpovídá čtvercovému kanálu) a rozsahu indexu toku 0 až 2 lze závislost ε a n považovat za lineární s koeficientem determinace větším než 0,986. Je nutno si dále uvědomit, pro index toku $n = 0$ není definována žádná z rovnic (3.3), (3.6), (3.8) a (3.9) a záporné hodnoty indexu toku nedávají fyzikální smysl. Ale jen pro pseudoplastické látky ($0 < n < 1$) byl předpoklad lineární závislosti potvrzen také experimentálně. Tuto závislost lze tedy obecně popsat rovnicí [Ayas, Skočilas, et al 2019]

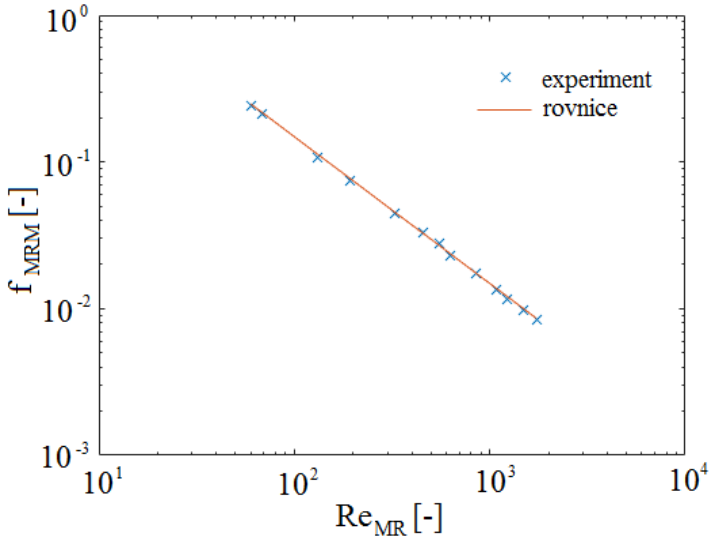
$$\varepsilon = \frac{Re_{MR}}{Re_G} = An + B \tag{3.11}$$

Koeficienty A a B jsou prozatím neznámé a je třeba je stanovit, např. následujícím způsobem. Pokud bychom chtěli vyšetřovat danou funkci v okolí bodu [0, 1], je třeba vyčíslit limitu zprava, kde z obr. 3-3 budeme předpokládat, že je rovna 1. Pak platí

$$\lim_{n \to 0^+} \left[\frac{4(a + bn)}{3n + 1}\right]^n = \lim_{n \to 0^+} (An + B) = 1 \tag{3.12}$$

Z této rovnice vyplývá, že konstanta B je rovna 1, tedy rovnici (3.11) lze přepsat do tvaru

$$\varepsilon = \frac{Re_{MR}}{Re_G} = An + 1 \tag{3.13}$$



Obr. 3-4 Porovnání experimentálních dat [Hartnett, 1985] s predikcí navržené rovnice (3.17) [Ayas, Skočilas, 2019]

Dosazením za obě definovaná Reynoldsova čísla Re_{MR} a Re_G dostaneme rovnice

$$An + 1 = \left[\frac{4(a + bn)}{3n + 1}\right]^n \tag{3.14}$$

Tato rovnice musí platit také pro newtonské kapaliny, tzn., že musí vyhovovat i rovnici (3.7) a (3.4) pro $n = 1$. Potom koeficient A lze definovat následující rovnicí.

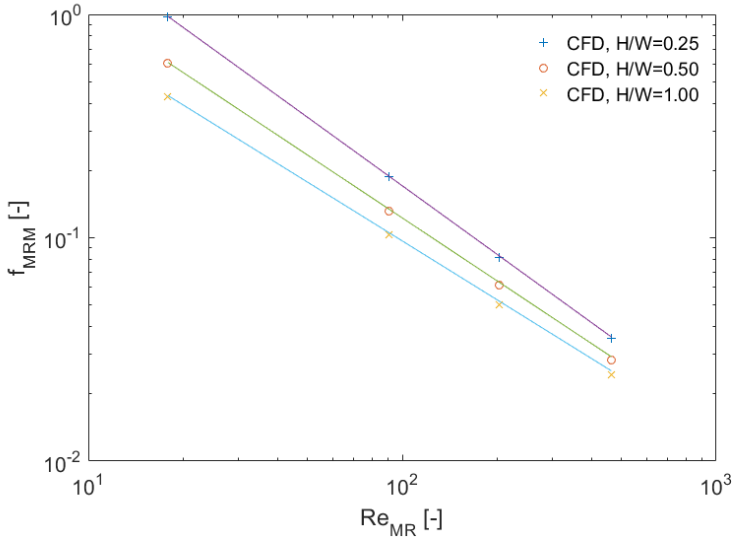
$$A = \left(\frac{C}{16} - 1\right) \tag{3.15}$$

Po upravení vztahu pro zobecněný tvar Reynoldsova čísla (3.6) dosazením z rovnice (3.14) dostaneme rovnici

$$Re_{GA} = \frac{2^{3-n}\rho\bar{u}^{2-n}D_h^n}{(An+1)K\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n} \tag{3.16}$$

Tab. 3.2 Porovnání experimentálních dat [Hartnett, 1985] a výsledků rovnic (3.2) a (3.17). Všechny hodnoty uvedené v tabulce jsou bezrozměrné [Ayas, Skočilas, et al 2019]

n [Harnett, 1985]	Re_G Rov. (3.6)	Re_{MR} Rov. (3.9)	f_{EXP} [Harnett, 1985]	***f*** Rov. (3.2)	***f*** Rov. (3.17)
0,542	297	292,5	0,0495	0,0539	0,0538
0,563	616	606,3	0,0241	0,026	0,026
0,577	749	736,9	0,0218	0,0214	0,0214
0,59	1291	1269,7	0,0116	0,0124	0,0124
0,601	1715	1686,2	0,0088	0,0093	0,0093
0,616	2170	2132,6	0,0074	0,0074	0,0074



Obr. 3-5 Porovnání numerické simulace CFD s rovnicí (3.17), [Ayas, Skočilas, et al 2019]

Nyní již stačí jen dosadit rovnici (3.16) do rovnice (3.2) s použitím rovnic (3.9) a (3.15) a získáme výslednou formu závislosti $f.Re_{MR}$ pro plně vyvinutý laminární profil proudění kapaliny definované mocninovým modelem pro obdélníkový průřez potrubí v následujícím tvaru [Ayas, Skočilas, et al 2019]

$$fRe_{MR} = (C-16)n + 16 \tag{3.17}$$

V rovnici (3.17) je použita standardní definice Reynlodsova čísla podle Metzner-Reed [Metzner, 1955] a koeficientu *C* pro newtonské kapaliny v obdélníkovém průřezu, kterou lze nalézt v každé učebnici mechaniky tekutin. Výhoda této rovnice je v jednoduchosti a v použití historicky ověřeného a používaného koeficientu pro newtonské kapaliny. Tato rovnice je platná

také pro newtonské kapaliny, kdy index toku je 1, a rovnice tedy přejde na známý tvar (3.4). Nicméně, před jejím použitím a rozšířením do obecného povědomí, je nutné její predikci ověřit experimentálními daty nebo původním verifikovaným výpočtem.

K ověření navržené rovnice byla použita experimentální data uváděná v literatuře. Hartnett [Hartnett, 1986] měřil třecí součinitel při toku mocninové kapaliny s indexem toku $n = 0,64$ až 0,65 v obdélníkovém kanále. Porovnání experimentálních dat s predikcí rovnice (3.17) je uvedeno na obr. 3-4. Maximální odchylka mezi výsledky rovnice a experimenty činí 4 %.

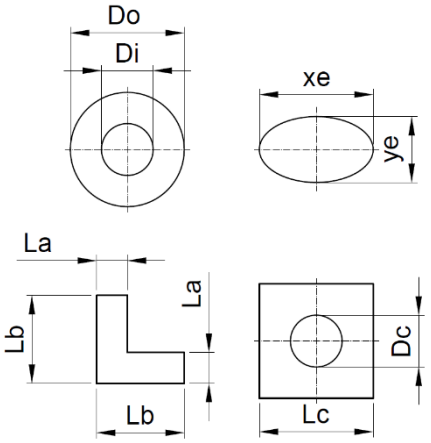
Pro další porovnání navržené rovnice (3.17) s experimentálními daty byla použita data z literatury [Hartnett, 1985]. V tab. 3.2 jsou porovnána experimentální data s navrženými rovnicemi (3.17) a (3.2). Maximální odchylka naměřených hodnot od vypočtených je 8 %, ale výsledky obou rovnic jsou téměř totožné.

Pro eliminaci numerické chyby vlivem řídké sítě byla provedena CGI analýza sítě a zvolena dostatečně hustá síť. Reologické parametry kapaliny byly nastaveny pro konstantní koeficient konzistence $K = 5$ Pa.s^n pro všechny řešené případy a index toku 0,3; 0,4; 0,5 a 0,7. Střední rychlost kapaliny byla zvolena 2 m.s^{-1}, což odpovídá Reynoldsově číslům Re_{MR} v rozmezí od 20 do 500. Porovnání numerického řešení s rovnicí (3.17) je uvedeno na obr. 3-5. Maximální rozdíl mezi numericky vypočtenými daty a navrženou rovnicí je 3,5 %.

Z výše uvedených důkazů je zřejmé, že rovnice (3.17) splňuje inženýrskou přesnost, vyrovná se svou predikcí historicky používaným rovnicím, které navrhli Kozicki a Metzner. Rovnice (3.17) s přesností do 4 % je použitelná pro výpočet třecího součinitele kapaliny popsané mocninovým modelem pro plně vyvinutý laminární tok v obdélníkovém kanále v rozsahu poměru stran 0 až 1 a pro index toku $0 < n < 1$.

Dále jsem zjistil, že navrženou rovnici lze použít pro další tvary nekruhového potrubí s podobnou přesností. Příkladem může být eleiptický tvar, mezikruží, průřez tvaru symetrického L a čtvercové potrubí s kruhovým jádrem, viz obr. 3-6. Koeficienty *a* a *b* rovnice (3.10) jsou uvedeny v tab. 3.3 [Metzner, 1955; Šesták, 1999].

Body na obr. 3-7 byly získány výpočtem rovnice (3.10) za konstanty *a* a *b* byly dosazeny hodnoty z tab. 3.3.



Obr. 3-6 Geometrie vyšetřovaných nekruhových profilů potrubí

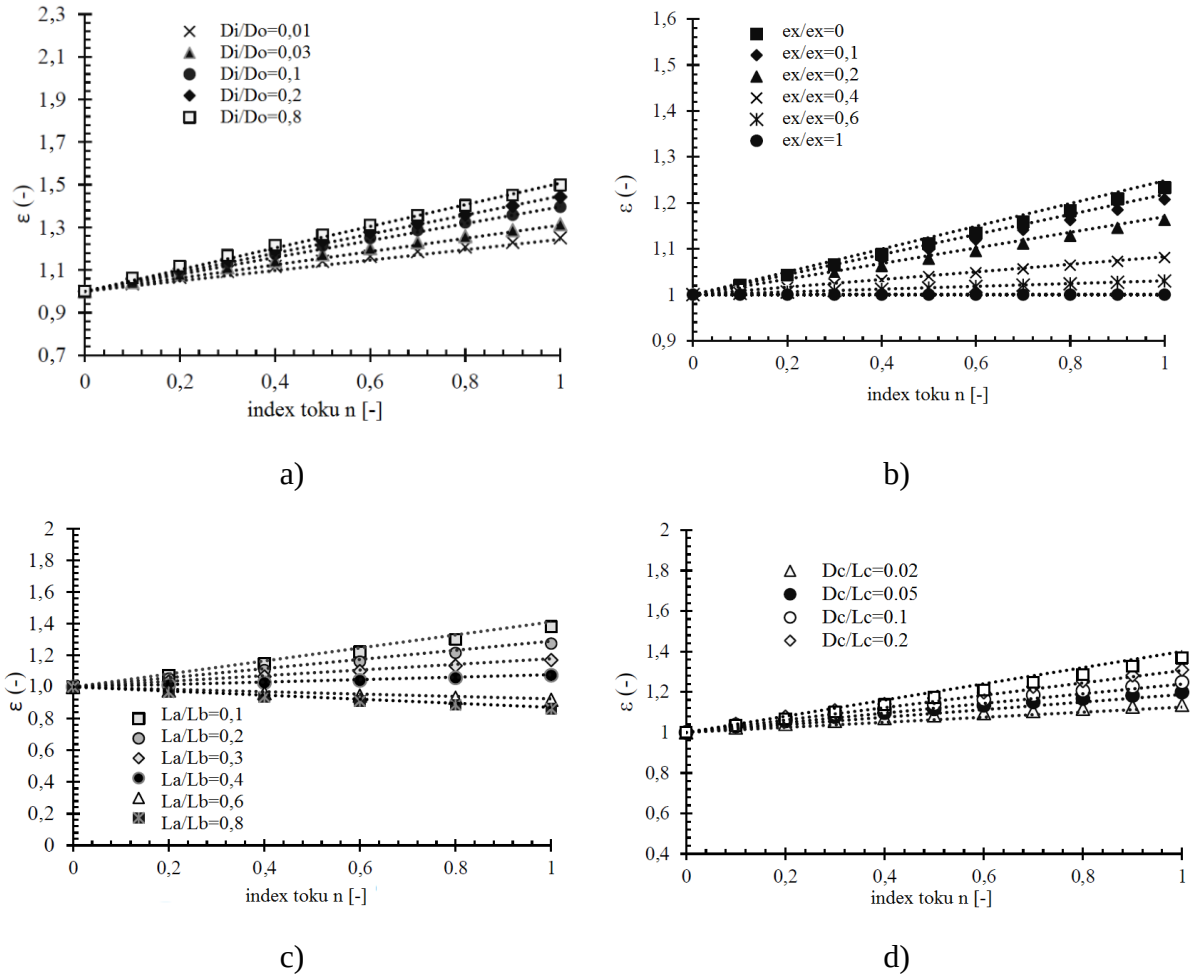
Pro všechny studované geometrie nekruhového průřeu je odchylka rovnice (3.17) a používaných rovnic navržených Kozickim a Metznerem menší než 2 %. Byly studovány také další geometrie jako například profil ronoramenného trojúhleníku nebo excentrického mezikruží. U rovnoramenného trojúhelníku není závislost zavedeného poměru Reynoldsových

čísel ε (3.10) lineární a stejně jako u excentrického mezikruží vykazovaly výsledky výpočtu rovnice (3.17) vyšší chybu oproti historickým datů.

Opět lze konstatovat, že navrženou rovnici (3.17) lze použít pro predikci třecího součinitele kapaliny popsané mocninovým modelem pro plně vyvinutý laminární tok v kanále tvaru zkoumaných profilů (mezikruží, elipsa, symetrický L profil a čtvercový profil s kruhovým jádrem) pro index toku $0 < n < 1$.

Tab. 3.3 Hodnoty geometrických parametrů *a, b* pro nenewtonskou kapalinu v nekuhovém profilu potrubí z [Metzner, 1955; Šesták, 1999], rozměry dle obr. 3-6

mezikruží			***elipsa***		
Di/Do	*a*	*b*	*ex/ey*	*a*	*b*
0,00	0,2500	0,7500	0,0	0,3084	0,9253
0,01	0,3768	0,8751	0,1	0,3018	0,9053
0,03	0,4056	0,9085	0,2	0,2907	0,8720
0,10	0,4455	0,9510	0,3	0,2796	0,8384
0,20	0,4693	0,9837	0,4	0,2702	0,8107
0,40	0,4890	0,9911	0,5	0,2629	0,7886
0,50	0,4935	0,9946	0,6	0,2575	0,7725
0,60	0,4965	0,9972	0,7	0,2538	0,7614
0,70	0,4983	0,9987	0,8	0,2515	0,7546
0,80	0,4992	0,9994	0,9	0,2504	0,7510
1,00	0,500	1,00	1,0	0,2500	0,7500
symetrický L profil			***čtvercové potrubí s kruhouvým jádrem***		
La/Lb	*a*	*b*	*Dc/Lc*	*a*	*b*
0,1	0,3713	1,0101	0,1	0,3780	0,8701
0,2	0,3299	0,9434	0,2	0,3987	0,9107
0,4	0,2628	0,8110	0,4	0,3996	0,9743
0,6	0,2168	0,7024	0,6	0,3524	1,0163
0,8	0,2049	0,6576	0,8	0,2511	0,9482



Obr. 3-7 Závislost ε na příslušném geometrickém parametru nekruhového kanálu a indexu toku, a) mezikruží, b) elipsa, c) symetrický profil L, d) čtvercový kanál s kruhovým jádrem

3.3 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI KOLAGENNÍ HMOTY

3.3.1 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ HMOTY VYTLAČOVACÍM REOMETREM

Pro zjištění tokových vlastností kolagenní hmoty jsem navrhl rozsáhlou rekonstrukci stávajícího kapilárního reometru a provedl experimenty s kolagenní hmotou nejprve na původním měřicím zařízení a poté na novém reometru. Z opakovaných experimentů jsem vyhodnotil tokové vlastnosti hmoty.

Nejčastější použití kolagenní hmoty nalezneme v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, nebo biomedicíně. Pro průmyslové zpracování je nutno kolagenní hmotu nejprve upravit dle požadavků kladených na výsledný produkt. Běžně se používá chemické či tepelné zpracování. V obou případech jde o získání kompaktní molekulární struktury, zesíťováním kolagenních vláken. Pro chemickou modifikaci se používají látky glutaraldehyd nebo polyvinylalkohol, které se s kolagenní hmotou smíchají. Tyto směsi naleznou využití například při výrobě cévních náhrad (biochemie) [Kumar, 2013] nebo obalového materiálu uzenářských výrobků [Deiber, 2011].

Příprava kolagenní hmoty se provádí v desintegračních a separačních zařízeních, průmyslově zpracovávajících především kůže a další části těl živočichů určených pro lidskou spotřebu a obsahující kolagen.

Zpracovatelské operace zahrnují promíchávání a homogenizaci (hnětení), čerpání a dopravu hmoty potrubím k hlavnímu výrobnímu stroji, kterým je ve většině případů extrudér.

Vzhledem k biologickému charakteru suroviny je složité nastavit výrobní proces bez neustálé regulace operačních parametrů linky, neboť „kvalita“ suroviny se liší dle ročního období, zdroje (farmy) živočichů, nebo i kus od kusu. Z hlediska udržení konstantního výrobního výkonu linky je zapotřebí kvantifikovat vlastnosti vstupní suroviny na základě údajů dostupných z měřicích průmyslových technik (nejlépe s online zpracování dat).

Dosavadní praxe řízení a nastavení výrobní linky v potravinářských provozech je založena na empirických zkušenostech obsluhy, především na zrakových a hmatových vjemech suroviny a produktu, v lepším případě na několika málo parametrech linky, které jsou online sledovány, zobrazeny na displeji a zaznamenány v databázi (spíše jako zdroj dat pro kontrolu dozorových orgánů potravinářského průmyslu, než pro optimalizaci výrobní linky). Tomuto způsobu řízení také nahrává jistá pružnost nebo možnost rozšíření intervalu nastavení operačních parametrů jednotlivých uzlů linky, se kterými se počítá při technicko-inženýrském návrhu zařízení. S touto praxí se můžeme setkat ve všech odvětvích potravinářského průmyslu, neboť ten je příliš konzervativní, než aby implementoval radikální změny či nové technologie do výroby. Nicméně, vzhledem k pevným požadavkům zákazníka na stabilní chuť a aroma (včetně dalších očekávaných vlastností produktu, např. křupnutí při skusu nebo lomu, lupnutí při zlomení povrchové vrstvy, atd.) se nelze divit současnému uměle stabilizovanému stavu, kterému potravinářský průmysl nutně podléhá.

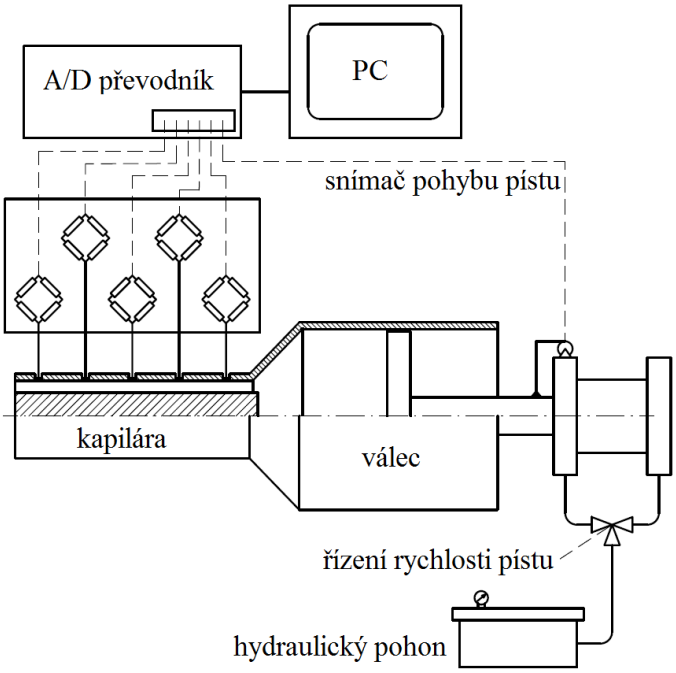
Tento přístup však při případných podmínkách zvyšující se poptávky trhu, a tedy následně při zvyšování výrobní kapacity provozu, vede k dosažení hranice výkonu linky a další pokusy o zvýšení produkce jsou provázeny nezdarem způsobeným nikoliv technologií zpracování, ale limity základních fyzikálních zákonů. V tu chvíli již nestačí léty provozu nabyté nebo předávané empirické zkušenosti obsluhy a je třeba použít standardní nástroje optimalizace. Vedle sledování a analýzy provozních dat, je nutno také sledovat kvalitu vstupní suroviny.

Nejdůležitějšími parametry pro technologii zpracování kolagenní hmoty jsou tokové vlastnosti suroviny. Vzhledem k rozsahu smykových rychlostí se jeví jako nejvhodnějším na sledování vlastností hmoty a jednoduchého měření kapilární nebo vytlačovací reometr. Oba tyto přístroje zajišťují, že jsou podmínky toku kolagenní hmoty podobné jako při jeho zpracování. Z naměřených dat, společně s hustotou, lze dopočítat náročnost zpracování specifického materiálu hydromechanickými procesy a optimalizovat chod linky dle chování vstupní suroviny.

Zmiňované kapilární či vytlačovací reometry se nejčastěji používají k měření tokových vlastností visoceviskózních nestlačitelných kapalin (typicky taveniny polymerů nebo těsta). Zařízení sestává z nádoby se vzorkem, dopravním mechanismem a měřicí celou. Kapalinu je možno do měřicí cely dopravovat třemi způsoby: stlačeným vzduchem (např. Anton Paar, HVA6), šnekovým dopravníkem (většina hnětacích strojů) nebo přímočaře se pohybujícím pístem ve válci. Asi největší nevýhodou kapilárních a vytlačovacích reometrů je krátká doba zdržení materiálu v měřicí komoře, což omezuje použití těchto přístrojů na kapaliny s časově nezávislými parametry.

Snad jedinou výjimkou je reometr umožňující vícenásobný průchod vzorku měřicí celou (Strata Technologies, MPR). Jeho konstrukce je tvořena dvěma protiběžnými písty, mezi kterými je umístěna měřicí cela. Vzorek se přemísťuje z jednoho válce do druhého průchodem měřicí celou. Tím je zajištěna opakovatelnost měření stejného vzorku (a např. zamezení kontaminace vzorku). Příkladem použití tohoto reometru je například vyhodnocení hystereze nebo vliv předzpracování vzorku.

Mezi nejlepší vysokotlaké reometry z hlediska přesnosti a množství měřených výstupů lze zařadit například kapilární reometry (Instron, SmartRheo CEAST50), (Bohlin Instruments, RH 2000) nebo (Göttfert, RHEOGRAPH), jejichž měřicí princip je založen na Rosandově dvoukapilárním konceptu. Tento koncept umožňuje zároveň měřit na krátké a dlouhé kapiláře s cílem stanovit nátokovou tlakovou ztrátu v trysce korekční metodou [Bagley 1957]. Pro stanovení nátokové tlakové ztráty a elongační viskozity lze použít Cogswellovu metodu [Cogswell, 1972]. Tyto reometry také umožňují měřit skluz na stěně.



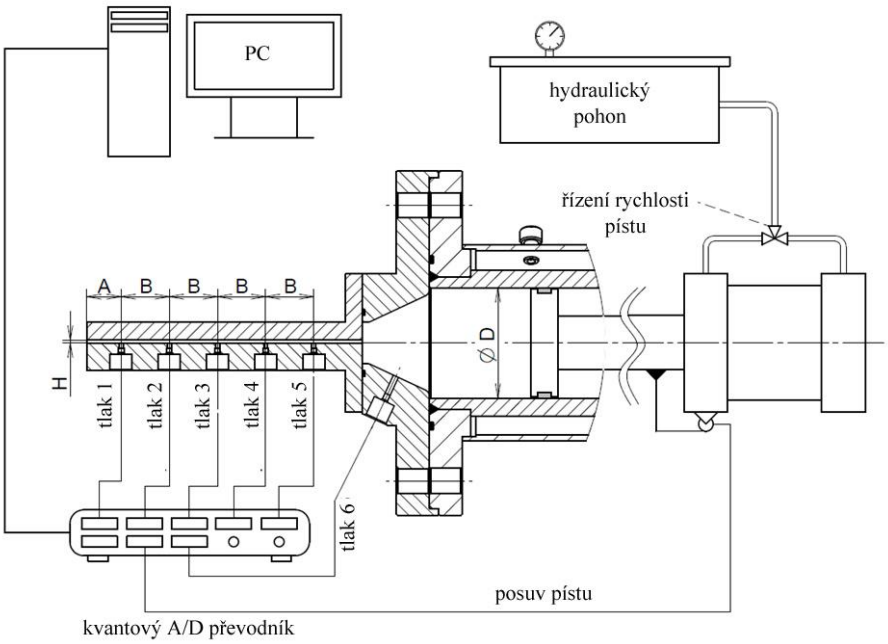
Obr. 3-8 Schéma vytlačovacího reometru s mezikruhovou kapilárou [Skočilas, 2016]

V rámci podrobnějšího studia tokových vlastností kolagenní hmoty jsem vyvinul kapilární reometr vlastní koncepce, s různou geometrií kapiláry [Skočilas, 2016 (*ICR2016*)]. Nový koncept umožňuje měření axiálního profilu tlaku podél kapiláry, která je osazena pěti tlakovými senzory. Z tohoto naměřeného profilu lze stanovit výstupní tlak. Na základě zkušeností z provozu tohoto zařízení byl navržen matematický model postihující stlačitelnost kolagenu, neboť při manipulaci s hmotou a plnění válce docházelo k vytvoření vzduchových kapes v materiálu a v prostoru mezi materiálem a stěnou. Stlačitelnost kolagenu, resp. náplně reometru, je důležitým technologickým parametrem, neboť s jeho pomocí lze naměřená reologická data korigovat.

Pro experimenty jsem zvolil vodný roztok kolagenní hmoty se třemi koncentracemi kolagenu (typu I, z hovězích kůží, resp. podkoží - škáry) od 6,6 % do 8 % hmotnostních. Při takto vysokých koncentracích kolagenu připomíná hmota konzistenci chlebového těsta. Kolagenní hmota se lišila nejen koncentrací, ale i datem zpracování. Vzorky byly připraveny stejným procesem přípravy jako při průmyslovém zpracování, bez významných teplotních šoků (způsobujících např. želatinaci) a bez chemických aditiv (bez zesíťování vláken).

Reometr vlastní konstrukce (obr. 3-6) je tvořen, stejně tak, jako výše popsané průmyslové reometry, měřicí hlavou s kapilárou, válcovým zásobníkem hmoty a hydraulicky ovládaným pístem, umístěným v tomto zásobníku. Vše je ukotveno na robustní kovový rám. Bylo vyrobeno a použito několik měřicích hlav. Použil jsem dvě základní geometrie průřezu kapiláry a to mezikruhovou štěrbinu s různým poměrem vnějšího a vnitřního poloměru a obdélníkový profil

s různým poměrem stran. Pro různé geometrie kapilár byly použity různé metody snímání tlaku uvnitř kapiláry, vzhledem k postupnému vývoji reometru.



Obr. 3-9 Schéma vytlačovacího reometru s obdélníkovou štěrbinou [Skočilas, 2017]

Mezikruhová štěrbina byla vybavena pěti tenzometry (HBM 120 Ω) umístěnými (nalepenými) na vyfrézovaných rovinných plochách podél vnějšího pláště měřicí hlavy. Tenzometry snímající napětí na stěně vnějšího pláště hlavy byly napojeny na měřicí plné můstky DAQP, umístěné ve sběrnici DEWERACK. Ta byla připojena na vyhodnocovací kartu NI A/D převodník v osobním počítači. Zpracování dat jsem provedl v software LabVIEW® a MATLAB®.

Před vlastním měřením byly tenzometry kalibrovány na vnitřní přetlak. K tomu sloužila kalibrační cela, která se připojila na měřicí hlavu, a do kapiláry se postupně vháněl dusík z tlakové láhve při konstantním tlaku. Takto jsem vytvořil kalibrační závislosti tlaku uvnitř kapiláry a napětí stěny, měřené tenzometry.

Rychlost pohybu pístu, a tedy průtok hmoty kapilárou, byl zaznamenáván lineárním potenciometrickým snímačem polohy (Micro-Epsilon, WPS-500). Signál byl zpracováván DAQP modulem kvůli časové synchronizaci zaznamenávaných signálů.

Vkládání kolagenní hmoty v případě původního vytlačovacího reometru, který byl osazen měřicí celou s mezikruhovou štěrbinou, bylo prováděno z přední části. Měřicí cela opatřená přírubou se musela sejmout, aby se válec ručně naplnil novým vzorkem. Po mé konstrukční i koncepční úpravě reometru, kdy jsem navrhl a nechal vyrobit novou měřicí celu včetně válce, vyjíždí píst mimo reometr v zadní části a válec je plněn zezadu. Tím nedochází k manipulaci s měřicí celou, ta je rozebírána jen na konci měření, z důvodu čistění všech součástí od vzorku.

Nová kapilára je navržena jako jednoduše rozebíratelná. Kapilára obdélníkového průřezu je tvořena dvěma částmi s podélnou dělicí rovinou, která je situována v úrovni spodní hrany kapiláry a tvoří tím jednu rovinu bez singularit povrchu. Ve spodní části měřicí cely jsou umístěny tlakové senzory, jejichž měřicí membrány jsou zalícovány a tvoří celistvou rovinou plochu spodní hrany kapiláry. Průměr membrány jsem zvolil co nejmenší, aby případný minimální přesah nenarušoval proudové pole vzorku. Horní část kapiláry je jednoduše

odnímatelná a je v ní vyfrézován přesný tvar obdélníkové kapiláry daných rozměrů (bez spodní hrany, tu tvoří spodní část). Tato jednoduchá konstrukce umožňuje rychle a snadno měnit geometrii kapiláry.

V důsledku změny způsobu měření axiálního tlaku novými senzory XPM4 (TE Conectivity, Bervyn, USA), došlo také k obměně záznamového zařízení. Stávající můstky jsem nahradil novým systémem snímání dat QuantumX MX840B (HBM, Brno). Připojení do A/D převodníku, stejně jako upravený měřicí software v prostředí LabVIEW, jsem jen mírně upravil dle nových připojených součástí.

Po naplnění a uzavření reometru je experiment připraven. Hydraulicky poháněný píst vytlačuje kolagenní hmotu z válce do kapiláry, jejíž konec není uzavřen a je zde ponechán volný výtok vzorku do připravené nádoby. Rychlost pístu není konstantní, ale plynule se zvyšuje při každém zdvihu. Tím je zajištěna zvyšující se rychlost deformace z 0 do maximálního dovoleného rozsahu.

Tab. 3.4 Rozměry a vypočítané geometrické parametry mezikruhové štěrbiny

	Vnitřní poloměr r	***Vnější poloměr R***	***Poměr poloměrů κ = r/R***	***Hydraulický průměr***
Jednotky	***[mm]***	***[mm]***	***[m/m]***	***[mm]***
Geometrie 1	18,6	28,0	0,664	9,4
Geometrie 2	22,6	28,0	0,807	5,4
Geometrie 3	24,6	28,0	0,879	3,4

Maximální rychlost pístu je 35 $mm.s^{-1}$. Maximální dosažitelná rychlost deformace odpovídá použité geometrii kapiláry, orientačně lze uvažovat rozsah smykových deformací od 100 do 3000 s^{-1}.

Každé měření v podstatě zaznamenává reogram, závislost smykového napětí na rychlosti deformace. Počet měřicích bodů odpovídá frekvenci snímkování polohy pístu a hodnot tlaku použitých senzorů, která je 1 kHz.

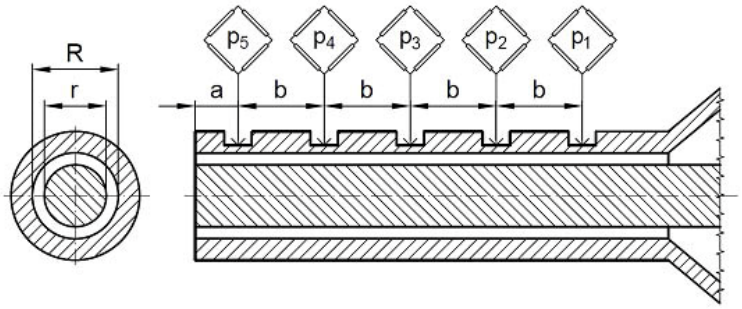
Průměrná doba jednoho experimentu je 1 minuta. Kolagen byl uchován v chladničce, teplota měřeného vzorku byla 8 °C. Teplotu vzorku jsem měřil před i po vytlačení. Vzhledem k rychlosti experimentu nebylo zaznamenáno zvýšení teploty vzorku vlivem tření.

Tab. 3.5 Rozměry a vypočtené geometrické parametry obdélníkové štěrbiny

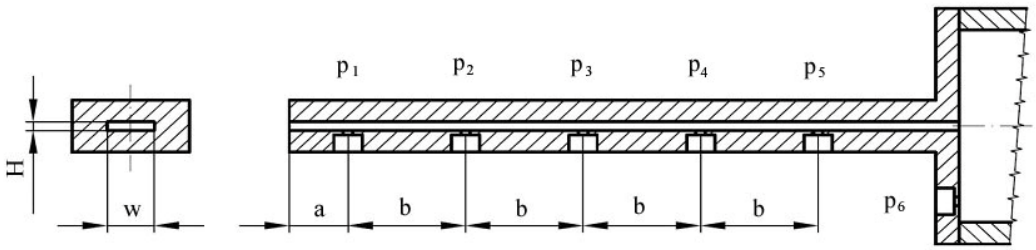
	Šířka W	***Výška H***	***Poměr stran H/W***	***Hydraulický průměr***
Jednotky	***[mm]***	***[mm]***	***[m/m]***	***[mm]***
Geometrie 4	20	1	0,05	1,90
Geometrie 5	20	2	0,10	3,64
Geometrie 6	20	4	0,20	6,67

Použil jsem tři mezikruhové kapiláry. Jejich rozměry s vypočteným poměrem vnitřního a vnějšího poloměru a také hydraulickým průměrem jsou uvedeny v tab. 3.4. Tvar kapiláry a rozmístění tenzometrických snímačů je uvedeno na obr. 3-10.

Po rekonstrukci vytlačovacího reometru jsem navrhl a nechal vyrobit obdélníkový tvar kapiláry. Byly použity tři geometrie, jejichž rozměry a geometrické charakteristiky jsou uvedeny v tab. 3.5. Tvar kapiláry včetně kót a rozmístění tlakových senzorů je zobrazeno na obr. 3-11.



Obr. 3-10 Tvar mezikruhové kapiláry s okótovanými rozměry a vzdálenost tlakových snímačů podél kapiláry, a = 25 mm a b = 50 mm



Obr. 3-11 Tvar obdélníkové kapiláry s okótovanými rozměry a vzdálenost tlakových senzorů podél kapiláry, a = 25 mm a b = 35 mm

Funkčnost zrekonstruovaného reometru byla ověřena na testovací kapalině. Výsledky experimentů byly porovnány s měřením testované kapaliny na komerčním rotačním reometru Rheotest II. Modelovou kapalinou byla vysokoviskózní newtonská látka, jejíž viskozita silně závisí na teplotě. Vybranou látkou byl květový med. Výsledky experimentů byly ve shodě s naměřenými daty na komerčním reometru. Kapilární reometr naměřil viskozitu 8,3 ± 0,6 Pa.s a rotační reometr 7,8 ± 0,1 Pa.s. Po důkladném vyčištění nového reometru proběhly předběžné testy proveditelnosti měření kolagenu na kapilárním reometru a po jejich úspěšném ukončení následovaly systematické experimenty s kolagenní hmotou.

Naměřená data, axiální profil tlaku podél kapiláry, resp. tlaková ztráta a rychlost pístu, resp. průtok kapaliny danou geometrií, jsem použil ke konstrukci reogramu (smykové napětí vs. rychlost deformace). K popisu reologického chování jsem použil dva základní čistě viskózní modely nenewtonské kapaliny a to mocninový model pseudoplastické kapaliny a Hesrschel-Bulkley model.

Průtok kapaliny kapilárou lze odvodit ze stacionární hydraulické charakteristiky pro oba modely z rovnice (3.20) [David, 1996]. Rovnice (3.18) odpovídá toku mocninové kapaliny

$$\dot{Q}_{PL} = \frac{\pi n R^3}{2(1+2n)}(1-\kappa)^2(1+\kappa)\left[\frac{\Delta p R(1-\kappa)}{2LK}\right]^{\frac{1}{n}} \tag{3.18}$$

Rovnice (3.19) představuje Herschel-Bulkley korekci.

$$K_{HB} = \left[1 - \frac{2\tau_y L}{\Delta p R(1-\kappa)}\right]^{\frac{n}{n+1}} \left[1 + \frac{2n\tau_y L}{(n+1)\Delta p R(1-\kappa)}\right] \tag{3.19}$$

Celkový průtok potom lze stanovit jako součin rovnice (3.18) a rovnice (3.19), kde pro nulovou mez toku, je Herschel-Bulkley korekce rovna 1.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{PL} K_{HB} \tag{3.20}$$

kde n je index toku kapaliny, R je poloměr kapiláry v případě mezikruží, κ je poměr vnitřního k vnějšímu poloměru mezikruhové kapiláry, Δp je tlaková ztráta v kapalině proudící kapilárou délky L, K je součinitel konzistence, τ_y je mez toku.

Smykové napětí na stěně lze definovat rovnicí

$$\tau_w = \frac{\Delta p R(1-\kappa)}{2L} \tag{3.21}$$

V případě obdélníkové štěrbiny lze použít identické vztahy, za předpokladu použití odvozené geometrické transformace parametrů mezikruhové štěrbiny R a κ, na rozměry obdélníkového průřezu kapiláry o rozměrech šířky W a výšky H profilu. Tato transformace vychází z jednoduchého rozvinutí mezikruhové štěrbiny do obdélníkového profilu. Zavedeme-li následující aproximaci pro výšku kapiláry

$$H = R(1-\kappa) \tag{3.22}$$

a pro šířku kapiláry

$$W = \pi R(1+\kappa) \tag{3.23}$$

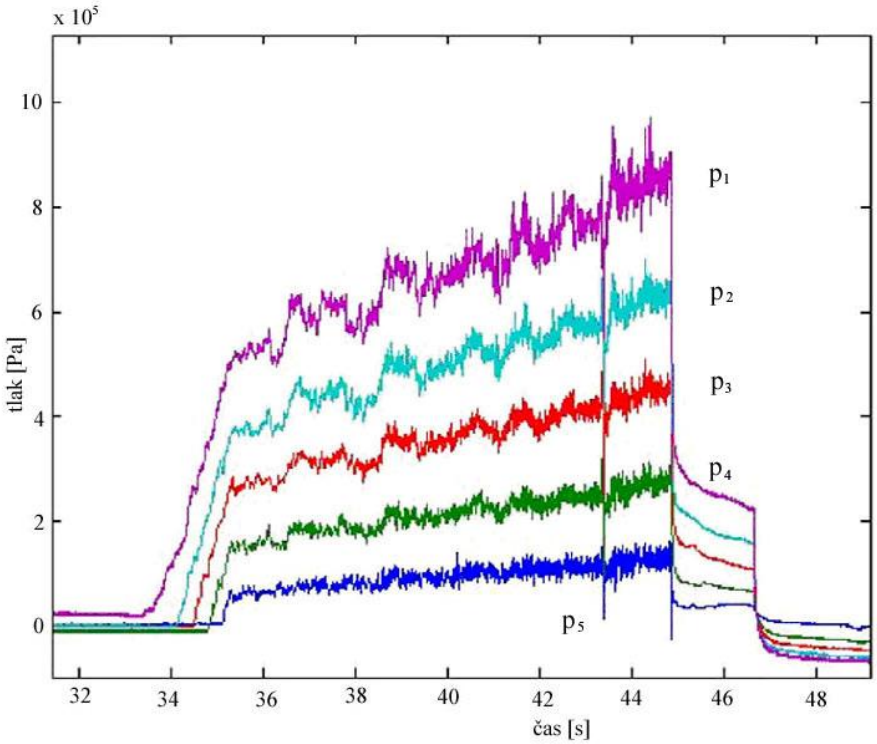
lze parametry κ a R v rovnicích (3.18) a (3.19) nahradit následujícími funkcemi

$$\kappa = \frac{1 - \pi \frac{H}{W}}{1 + \pi \frac{H}{W}} \tag{3.24}$$

a poloměr R

$$R = \frac{1}{1-\kappa} \tag{3.25}$$

Tvar rovnic (3.18) a (3.19) tím zůstává zachován, avšak hlavní výhodou zavedení geometrické transformace je usnadnění jejich algoritmizace pro následnou regresní analýzu naměřených dat, podle geometrie použité kapiláry při experimentech (lze řešit například jednoduchým přepínačem v algoritmu).

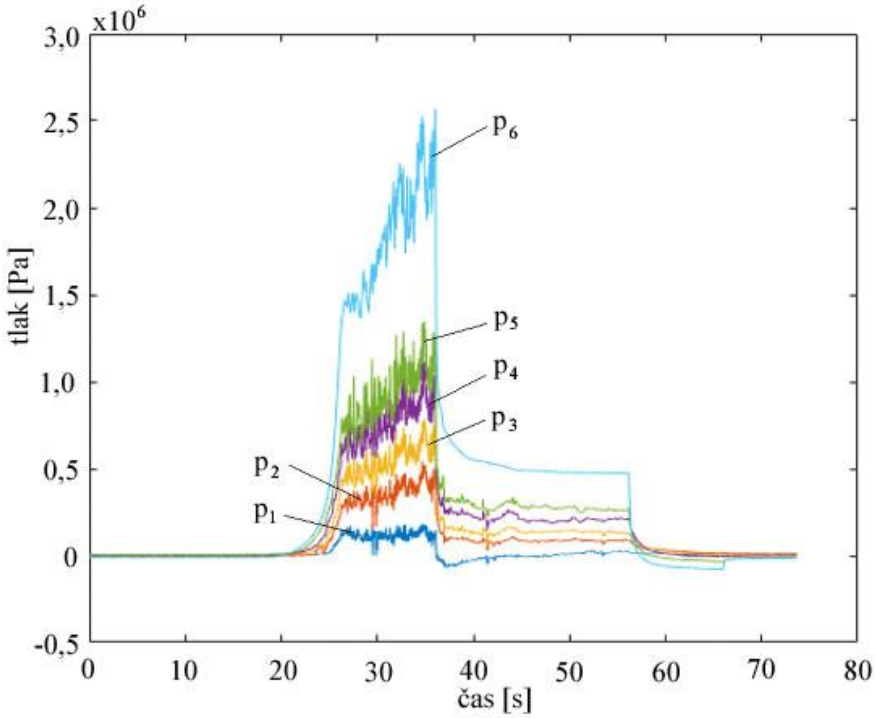


Obr. 3-12 Tlakové profily zaznamenané v čase pěti tlakovými senzory podél kapiláry s mezikruhovým průřezem [Skočilas, 2016]

Jestliže je měřen celkový průtok kapaliny protékající kapilárou je možno stanovit z rovnice (3.20), resp. rovnic (3.18) a (3.19) parametry mocninového modelu popisující chování protékající kapaliny, na základě regresní analýzy závislosti průtoku a tlakové ztráty. Je tedy zapotřebí naměřit více dvojic průtoků a jim odpovídajících tlakových ztrát. Nebo jako v případě použitého vytlačovacího reometru, který umožňuje regulaci rychlosti pístu, v každém experimentu zvyšovat rychlost pístu během jednoho zdvihu a tím měnit průtok kapaliny, resp. rychlost smykové deformace, kontinuálně. Současně je zaznamenávána měnící se tlaková ztráta a po transformaci naměřených dat lze získat reogram zkoumané kapaliny.

Typickým záznamem z výše popsaného měřicího zařízení je časová závislost tlaků měřených šesti tlakovými čidly a k nim spárovaná časová závislost zdvihu pístu, viz obr. 3-12 a 3-13. Pět tlakových senzorů jsem umístil podél kapiláry, šestý jsem vložil do stěny hlavy válce, ze které se kolagen vytlačuje do kapiláry.

V záznamu tlaků lze sledovat prudký nárůst hodnot tlaků v jednotlivých místech snímačů (časová prodleva vzrůstu jednotlivých signálů na začátku záznamu odpovídá aktuálnímu průtoku). Oblast zobrazených dat s výrazným šumem záznamu představuje také interval, kde dochází k toku kolagenu kapilárou a který je tedy vyhodnocen. Jednotlivé křivky, resp. hodnoty tlaků v daném čase, logicky odpovídají umístění tlakových snímačů, nevyšší tlakový profil odpovídá tlaku v zásobníku, druhý nejvyšší potom tlakovému snímači nejblíže hlavě reometru a nejmenší tlakový profil je zaznamenán snímačem v blízkosti ústí kapiláry. Okamžitý pokles tlaků odpovídá ztrátě hnací síly ve válci a tedy dosažení horní úvratě pístu. Následující trend křivek, tedy pozvolné ustálení na nenulové hodnotě tlaku, představuje vliv měřicího přístroje, kdy se píst vrací z horní úvratě zpět do dolní. Následná, v podstatě druhá skoková změna tlaku, představuje dosažení dolní úvratě pístu a jeho zastavení na počáteční pozici pro další experiment.



Obr. 3-13 Tlakové profily zaznamenané v čase šesti tlakovými senzory podél kapiláry s obdélníkovým průřezem [Skočilas, 2017]

Kolagenní hmota, zvláště s vysokým obsahem kolagenu (od 6 % hmotnostních výše), vykazuje chování podobné těstu. Při plnění válce reometru tedy nedochází k nalití vzorku do reometru, ale je nutné jej po kusech vkládat ručně. Při samotné výrobě kolagenní hmoty z hovězích kůží dochází vlivem neustálého promíchávání materiálu k vmíchávání bublinek vzduchu do hmoty. Kolagenní hmotu lze tedy považovat za dvoufázovou směs kapaliny a plynu, způsobenou postupem výroby hmoty a plněním reometru, kde se nevyhneme vzduchovým kapsám. Tuto skutečnost je nutno zahrnout do vyhodnocení parametrů mocninového modelu, neboť naměřená data budou tímto efektem zatížena. Předpokládejme tedy směs kapaliny a plynu, kde relativní hmotnostní podíl plynné složky bude konstantní. Počáteční hmotnost plynu M_g je zachycena v nepropustných buňkách kapaliny o hmotnosti M_l, za předpokladu, že nedochází k difúzi plynu do kapaliny a prostředí. Relativní hmotností podíl plynu lze poté definovat jako

$$\omega_g = \frac{M_g}{M_l} \tag{3.26}$$

Dále předkládám, že kapalina oproti směsi je nestlačitelná (hustota je konstantní), zatímco hustota plynu a tedy i objem směsi ve válci se mění. Za předpokladu ideálního plynu, lze hustotu vyjádřit pomocí tlaku a teploty uvnitř válce. Časovou změnu objemu směsi potom mohu definovat takto

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{V(t)\omega_g\rho_l}{\left(\frac{p}{R_gT} + \omega_g\rho_l\right)p}\frac{dp}{dt} \tag{3.27}$$

Z rovnice kontinuity, resp. objemové bilance stlačitelné kapaliny vytlačované z válce do kapiláry, lze sestavit následující rovnici

$$\Gamma = \frac{3n}{(1+2n)K^{\frac{1}{n}}} \tau_w^{\frac{1}{n}} \left[1 - \frac{2\tau_y L}{\Delta p R(1-\kappa)}\right]^{\frac{n}{n+1}} \left[1 + \frac{2n\tau_y L}{(n+1)\Delta p R(1-\kappa)}\right] \tag{3.28}$$

kde zavedená proměnná je

$$\Gamma = \frac{6}{\pi R^3 (1-\kappa)^2 (1+\kappa)} \left[u_P S_P - \frac{V(t)\omega_g \rho_l L}{\left(\frac{p}{R_g T} + \omega_g \rho_l\right) p} \frac{dp}{dt}\right] \tag{3.29}$$

Po zlogaritmování rovnic (3.28) a (3.29) získáme rovnici, která představuje přímé vyjádření mezi naměřenými daty, reprezentovanými transformovaným průtokem, tlakovou ztrátou a parametry reologického modelu K a n

$$n \log \Gamma = n \log\left(\frac{3n}{1+2n}\right) - \log K + \log \tau_w \left[1 + \frac{n\tau_y}{(n+1)\tau_w}\right]^n \left[1 - \frac{\tau_y}{\tau_w}\right]^{n+1} \tag{3.30}$$

Jedinou neznámou zůstává relativní hmotnostní podíl plynu v kapalině, který je nutno zjistit pomocí dalších speciálně navržených experimentů. Pro mocninovou kapalinu (τ_y = 0 Pa) lze přímo získat algoritmus pro identifikaci parametrů K a n z lineární závislosti transformovaného průtoku a logaritmu tlakové ztráty (tyto transformace jsou nezávislé na parametrech K a n), například pro nahrazení derivací konečnými diferencemi dostaneme

$$nZ_i = n \log\left(\frac{3n}{1+2n}\right) - \log K + W_i \tag{3.31}$$

kde transformovaný průtok

$$Z_i = \frac{6}{\pi R^3 (1-\kappa)^2 (1+\kappa)} \left[u_{Pi} S_P - \frac{V_i \omega_g \rho_l}{\left(\frac{p_i}{R_g T} + \omega_g \rho_l\right) p_i} \frac{p_i - p_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}\right] \tag{3.32}$$

a transformovaná tlaková ztráta

$$W_i = \log \frac{(p_i - p_{exit,i}) R(1-\kappa)}{2L} = \log \tau_{wi} \tag{3.33}$$

Ačkoliv se v inženýrské praxi k popisu tokových vlastností nenewtonských kapalin nejčastěji používají čistě viskózní modely, jako je mocninový model nebo Herschel-Bulkley model, lze z některých naměřených dat navrženého experimentu nalézt i parametry viskoelastického chování kapaliny, které se dá u biologických polymerů, stejně tak, jako u syntetických polymerů, očekávat. V případě zobecněné newtonské kapaliny jsou smyková napětí úměrná viskozitě a tenzoru deformací.

V případě použití tenzometrů jako snímačů tlaku pro kapiláru mezikruhového průřezu se neměří pouze izotropní tlak, ale celková napětí (zatížení) na stěně, tedy suma tlaku a normálová složka tenzoru dynamických napětí

$$\sigma_{yy} = -p + \tau_{yy} \tag{3.34}$$

V případě viskoelstických látek, resp. efektu, který při toku mohou tyto látky vykazovat, lze stanovit tzv. výstupní tlak v kapiláře (exit pressure), který je dán celkovým napětím na stěně v ústí kapiláry (a kde by měl být atmosférický tlak). Jedním z možných efektů, který lze sledovat v praxi a přisuzuje se chování viskoelastických látek, je nárůst průměru vytlačovaného vzorku ihned za ústím kapiláry (jet swelling). Výstupní tlak lze například určit extrapolací axiálního profilu napětí na stěně kapiláry v místě ústí kapiláry. Právě nenulový výstupní tlak indikuje, že v látce je přítomno normálové napětí dokonce i když je v daném místě rychlost deformace nulová, tedy nenulový tlak představuje indikátor viskoelastického chování látky. V případě jednoduchého smykového proudění, jako je například v uvedené kapiláře, je viskoelastické chování možno popsat třemi základními charakteristikami, čistě smykovým napětím definovaným rychlostí deformace

$$\tau_{xy} = \tau(\dot{\gamma}) \tag{3.35}$$

prvním rozdílem normálových napětí

$$N_1(\dot{\gamma}) = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \tau_{xx} - \tau_{yy} \tag{3.36}$$

a druhým rozdílem normálových napětí

$$N_2(\dot{\gamma}) = \sigma_{yy} - \sigma_{zz} = \tau_{yy} - \tau_{zz} \tag{3.37}$$

Z naměřených dat, především výstupního tlaku a průměru expandovaného vzorku těsně za ústím kapiláry, lze stanovit první rozdíl normálových napětí, kde σ_{xx} je normálové napětí ve směru osy kapiláry a σ_{yy} je normálové napětí ve směru radiálním směřujícím kolmo na stěnu kapiláry. Druhý rozdíl normálových napětí je ve většině případů velice malý a vzhledem k velké chybě měření se tato hodnota zanedbává [Davies, 1973]. Samozřejmě existují daleko přesnější metody měření funkcí N_1 a N_2, ty však vyžadují instalaci dvou tlakových snímačů, resp. tenzometrů. Jeden je umístěný na povrchu kapiláry a druhý uvnitř zahloubení v blízkosti protilehlé stěny kapiláry [Baird, 2008]. Stanovení parametrů funkce prvního rozdílu normálových napětí vychází z [Davies, 1973], neboť použitá aparatura neumožňuje aplikaci druhého tenzometru v blízkosti vnitřní stěny kapiláry. Funci N_1 lze tedy definovat jako

$$N_1(\dot{\gamma}) = \sigma_{xx} - \sigma_{yy} = p_{exit} + \tau_w \frac{\partial p_{exit}}{\partial \tau_w} + \frac{1}{4HW} \frac{\partial \tau_w T_L}{\partial \tau_w} \tag{3.38}$$

kde první člen představuje normálové napětí působící kolmo na stěnu σ_{yy}, a poslední člen zahrnuje tzv. efekt bobtnání (swelling efekt), který se ale často zanedbává. Vztah byl odvozen pro obdélníkovou kapiláru, H a W jsou rozměry kapiláry, T_L je osová síla v kapiláře. V případě, že je uvažovaná kapalina nestlačitelná, jsou izotropní tlak a výstupní tlak definovány jako proměnné, které nezávisí na atmosférickém tlaku. V případě stlačitelné kapaliny, za přítomnosti vzduchových bublin, je nutno vzít v potaz i atmosférický tlak a odečíst jej od výstupního tlaku.

Výstupní tlak závisí na smykovém napětí na stěně (nebo smykové rychlosti) a proto jej můžeme například aproximovat mocninovým modelem

$$p_{exit}(\tau_w) - p_a = K_e \tau_w^m \tag{3.39}$$

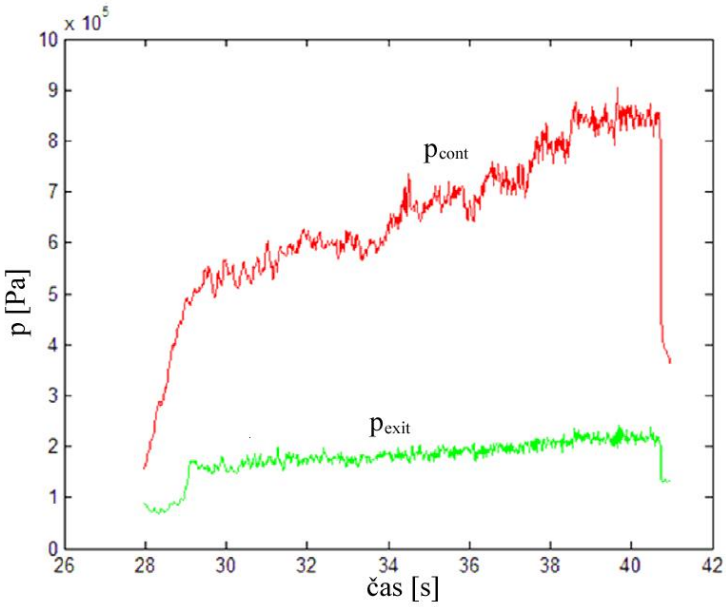
Parametry tohoto navrženého mocninového modelu K_e a m mohou být opět identifikovány lineární regresí naměřených dat, stejně jako v případě reologického modelu. Potom hodnoty výstupního tlaku a parametrů modelu K_e a m představují míru normálových napětí (elasticity) stejně tak, jako parametry mocninového modelu reogramu K a n jsou mírou smykových napětí (viskozity). Použitím mocninového modelu pro závislost výstupního tlaku na smykovém napětí na stěně lze definovat první rozdíl normálových napětí takto s použitím rovnic (3.38) a (3.39)

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})_w = p_{exit} - p_a + \tau_w \frac{\partial p_{exit}}{\partial \tau_w} \cong (1 + m) K_e \tau_w^m \tag{3.40}$$

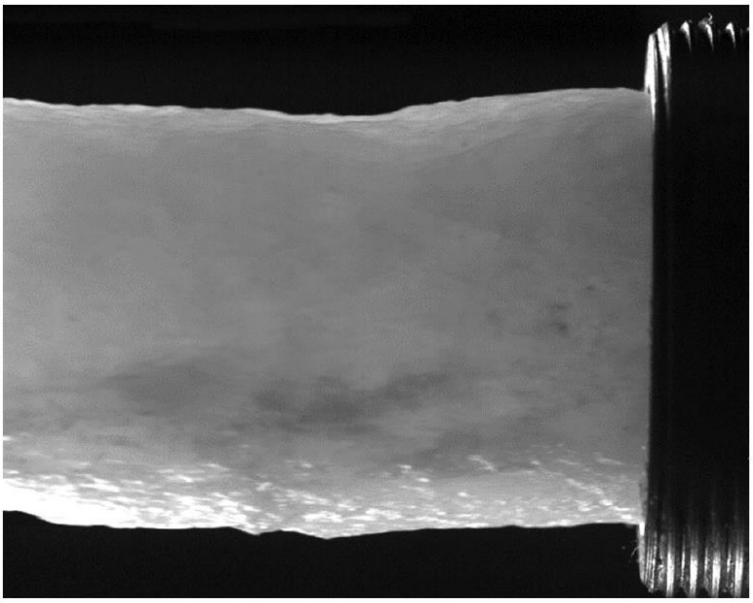
Zaznamenaná data byla zpracována vlastním programem v prostřední MATLAB. Z dat byl nejprve odstraněn šum použitím filtru Sawitski Golay. Regresní analýzou byly získány parametry konstitutivních rovnic modelu mocninné kapaliny a Herschel Bulkley modelu. Mez toku byla stanovena lineární interpolací ze změřených napětí na stěně. Pro výpočet prvního rozdílu normálových napětí bylo třeba určit výstupní tlak v ústí kapiláry. Ten byl stanoven extrapolací naměřených axiálních tlakových trendů ve výstupním průřezu kapiláry. Následující obr. 3-14 představuje příklad časové závislosti výstupního tlaku v ústí kapiláry a tlaku ve válci. Oproti obr. 3-12 a 3-13 byla odstraněna část tlakových křivek odpovídající náběhu experimentu a pohybu pístu zpět z horní úvrati do dolní úvrati.

Pro ověření viskoelastického chování kolagenní hmoty byl výtok zkoumaného materiálu ve výstupním otvoru zaznamenáván vysokorychlostní kamerou. Tento experiment byl zaměřen na sledování expanze materiálu ve výstupním průřezu kapiláry (Die sweell, Barus effect). Nicméně se vyhodnocením záznamu ukázalo, že k žádné výrazné expanzi materiálu nedochází (to bylo potvrzeno i statistickou analýzou obrazu celého záznamu, nikoliv jen jednoho snímku), viz obr. 3-15, což nemusí znamenat, že materiál není viskoelastický, jen byl asi rozsah použitých rychlostí smykových deformací příliš malý.

Výsledky experimentů jsem vyhodnotil a parametry reologických modelů s mezikruhovou kapilárou jsou uvedeny v tab. 3.6, 3.7 a 3.8, parametry pro obdélníkovou kapiláru v tab. 3.9, 3.10 a 3.11. Současně s hodnotami parametrů uvádím směrodatné odchylky. Na první pohled se zdá, že rozdíl mezi hodnotami indexu toku vyhodnocenými pro mocninovou kapalinu n = 0,22 (kolagen 2) a Herschel – Bulkley n = 0,36 (kolagen 1) je významný. Nicméně pro velkou část měřeného rozsahu smykových deformací jsou reogramy velmi podobné a liší se jen v oblasti nízkých a vysokých smykových deformací, viz obr. 3-16. Vzhledem k významné mezi toku, je indexu toku mocninového modelu nižší než modelu Herschel – Bulkley, což je pochopitelné.



Obr. 3-14 Průběh tlaku v ústí kapiláry p_{exit} (dopočítaný) a tlaku ve válci p_{cont} (měřený) [Skočilas, 2016]



Obr. 3-15 Fotografie výtoku kolagenní hmoty z kruhové kapiláry reometru, sledování expanze materiálu v ústí materiálu, která se nepotvrdila [Skočilas, 2016]

Tab. 3.6, 3.7 a 3.8 prezentují výsledky měření s jednou geometrií kapiláry mezikruhového průřezu s geometrickým parametrem κ = 0,664. Zároveň je v tabulkách uveden rozsah smykových deformací, pro které byly reologické parametry vyhodnoceny, viz rovnice (3-40) a také maximální dosažené smykové napětí v dané geometrii a pro příslušný zkoumaný vzorek. Tab. 3.6, 3.7 a 3.8 se liší použitou kolagenní hmotou, která měla pro každou sérii (tabulku) jiný obsah sušiny. Každou konfiguraci experimentu jsem provedl minimálně desetkrát.

Tab. 3.6 Parametry reologických modelů a modelu výstupního tlaku pro kolagenní hmotu (kolagen 1, obsah sušiny 6.6 % hm.), geometrie kapiláry $\kappa = 0{,}664$, rozsah smykových rychlostí (200-2000 s^{-1}) [Skočilas, 2016]

	Mocninový model		**Herschel – Bulkley model**			**Výstupní tlak**		**Maximální dosažené napětí**
	n	K	n	K	τ_y	m	K_e	τ_{max}
	[-]	[Pa.s^n]	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]	[-]	[Pa.s^m]	[Pa]
Hodnota	0,270	860	0,323	473	938	2,05	$6{,}7.10^{-11}$	6600
Směrodatná odchylka	0,010	25	0,049	193	380	1,54	$14{,}1.10^{-11}$	302

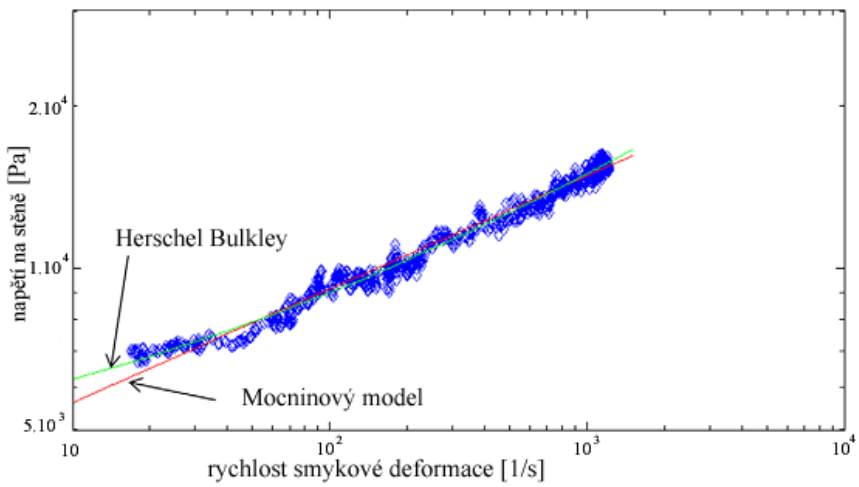
Tab. 3.7 Parametry reologických modelů a modelu výstupního tlaku pro kolagenní hmotu (kolagen 2, obsah sušiny 7.2 % hm.), geometrie kapiláry $\kappa = 0{,}664$, rozsah smykových rychlostí (250-2500 s^{-1}) [Skočilas, 2016]

	Mocninový model		**Herschel – Bulkley model**			**Výstupní tlak**		**Maximální dosažené napětí**
	n	K	n	K	τ_y	m	K_e	τ_{max}
	[-]	[Pa.s^n]	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]	[-]	[Pa.s^m]	[Pa]
Hodnota	0,215	1495	0,363	518	4000	1,07	$10{,}9.10^{-11}$	16000
Směrodatná odchylka	0,013	216	0,045	203	722	0,07	$6{,}5.10^{-11}$	379

Tab. 3.8 Parametry reologických modelů a modelu výstupního tlaku pro kolagenní hmotu (kolagen 3, obsah sušiny 8.0 % hm.), geometrie kapiláry $\kappa = 0{,}664$, rozsah smykových rychlostí (350-3000 s^{-1}) [Skočilas, 2016]

	Mocninový model		**Herschel – Bulkley model**			**Výstupní tlak**		**Maximální dosažené napětí**
	n	K	n	K	τ_y	m	K_e	τ_{max}
	[-]	[Pa.s^n]	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]	[-]	[Pa.s^m]	[Pa]
Hodnota	0,233	1700	0,291	960	1500	4,79	$3{,}8.10^{-11}$	12300
Směrodatná odchylka	0,017	204	0,021	263	945	1,68	$4{,}9.10^{-11}$	740

Při porovnání uvedených hodnot parametrů modelů nelze jednoznačně určit jejich závislost na koncentraci sušiny v kolagenu, neboť v případě mocninového modelu oba parametry a v případě Herschel-Bulkley modelu všechny tři parametry variují. To je nejspíše způsobeno vzduchovými bublinami přítomnými ve zkoumané hmotě po naplnění válce reometru. Tyto bubliny způsobují oscilace v měřených tlakových profilech, které je nutno nejprve vyhladit (filtrovat) před vlastním zpracováním. Nicméně je možno modely porovnat jedním vybraným parametrem, kterým může být například napětí na stěně pro zvolenou konstantní hodnotu rychlosti smykové deformace z intervalů platnosti modelů.



Obr. 3-16 Porovnání Herschel Bulkley modelu (zelená čára) a mocninového modelu (červená čára) s experimentálními daty (modré body) [Skočilas, 2016]

Pro hlubší studium chování toku kolagenní hmoty jsem provedl experimenty zaměřené na zjištění existence tzv. skluzu látky po stěně. Pro měření jsem použil kapiláry s různou geometrií κ = 0,664; 0,807 a 0,879 a zkoumanou látkou byl kolagen 1 s obsahem sušiny 6,6 % hm. sušiny. Výsledky parametrů mocninového modelu jsou uvedeny v tab. 3.9.

Z porovnání dat vyplývá, že hodnota indexu toku *n* je prakticky nezávislá na geometrii kapiláry s mezikruhovým průřezem, avšak hodnota koeficientu konzistence *K* má rostoucí tendenci vzhledem ke klesající hodnotě geometrického parametru κ. Tyto rozdíly jsou statisticky významné. Vzhledem ke konstantní hodnotě indexu toku pro všechny geometrie, lze konstatovat, že nebyl zaznamenán výrazný skluz materiálu po stěně. V některých případech se vytvoří mezi vrstvou materiálu a stěnou tenká vrstva látky, která snižuje tření mezi látkou a stěnou. Tento jev lze například pozorovat u dopravy mletého masa potrubím, kde vlivem deformací v mase při dopravě dochází k vytěsnění tuku do prostoru mezi masem a stěnou potrubí. Následně tuk působí jako lubrikant a dochází ke klouzání masa po stěně.

Tab. 3.9 Parametry mocninového modelu pro různé geometrie kapiláry, skluz po stěně, (kolagen 1, obsah sušiny 6,6 % hm.), rozsah smykových rychlostí (200-2000 s^{-1}) [Skočilas, 2016]

	κ = 0,664		**κ = 0,807**		**κ = 0,879**	
	n	*K*	*n*	*K*	*n*	*K*
	[-]	[Pa.s^n]	[-]	[Pa.s^n]	[-]	[Pa.s^n]
Hodnota	0,27	860	0,27	740	0,28	490
Směrodatná odchylka	0,01	25	0,01	20	0,02	60

Závislost koeficientu konzistence na geometrickém parametru lze vyjádřit rovnicí s empirickými parametry (R^2 =1)

$$K = 872 - 1903\kappa^{12,5} \tag{3.41}$$

Pro nekonečně úzkou kapiláru, kdy $\kappa = 1$, však materiálový parametr - koeficient konzistence vychází záporný, pro kapiláru čistě kruhového průřezu $\kappa = 1$, se blíží hodnotě 872 Pa.s^n. Vzhledem k tomu lze konstatovat, že uvedená rovnice (3.41) platí pouze v rozsahu geometrického parametru κ od 0,66 do 0,88.

Tab. 3.10 Parametry mocninového modelu v závislosti na koncentraci sušiny v kolagenní hmotě, rozsah smykových rychlostí (350-2000 s^{-1}), κ = 0,664, τ_w počítáno pro konstantní smykovou rychlost 1000 s^{-1} [Skočilas, 2016]

	Kolagen 1 (6,6 %)			**Kolagen 2 (7,2 %)**			**Kolagen 3 (8,0 %)**		
	n	K	τ_w	n	K	τ_w	n	K	τ_w
	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]
Hodnota	0,274	832	5522	0,216	1504	6687	0,248	1722	9551
Směrodatná odchylka	0,009	51	-	0,008	83	-	0,003	33	-

Pro snadné porovnání tokového chování kolagenní látky při různých hmotnostních podílech sušiny jsem vypočetl z mocninového modelu napětí na stěně za předpokladu konstantní smykové rychlosti rovné 1000 s^{-1}, která leží ve všech intervalech spolehlivosti modelů jednotlivých koncentrací, viz tab. 3.10. Index toku nevykazuje významné výkyvy oproti koeficientu konzistence, který roste, což může být způsobeno převážně rostoucí koncentrací sušiny ve hmotě. Z tab. 3.10 je také zřejmé, že s rostoucí koncentrací sušiny roste hydraulický odpor hmoty vůči její dopravě. Tato závislost je spíše exponenciální ($R^2 = 1$) a je vyjádřená rovnicí

$$\tau_w = 403e^{\frac{39M_D}{M}} \tag{3.42}$$

kde M_D je hmotnost sušiny a M je hmotnost směsi. Parametr 403 Pa odpovídá zřejmě napětí na stěně při toku látky s nulovou koncentrací sušiny. Pokud bychom uvažovali, že kolagenní hmota je opravdu jen vodný roztok kolagenu, potom by tento parametr odpovídal toku vody při dané smykové rychlosti 1000 s^{-1} a pro danou geometrii (smyková rychlost odpovídá přibližně střední rychlosti proudění v dané geometrii až 30 m.s^{-1} pro vodu).

Jednoduchým výpočtem viskozity nebo tlakové ztráty jsem ověřil pro newtonskou látku, že tento předpoklad není splněn, proto tuto rovnici (3.42) nemohu považovat za obecnou a bude do budoucna třeba použít více druhů hmot s různou koncentrací sušiny. Tato rovnice (3.42) má tedy omezenou platnost v rozsahu koncentrací sušiny 6 – 8 % hmotnostních.

Stejné pokusy jsem provedl po rekonstrukci reometru, s použitím nových geometrií kapilár – obdélníkových průřezů. Ty umožnily především snazší instalaci tlakových snímačů, odstranily nutnost kalibrace snímačů, a novou konstrukcí umožnily snadnou změnu geometrie kapiláry výměnou jednoho kusu reometrické hlavy, viz obr. 3-9. Změnou geometrie jsem dosáhl vyšších smykových rychlostí v obdélníkové kapiláře.

Pro měření jsem použil kolagenní hmotu označenou jako Kolagen 4 s obsahem sušiny 9,5 % hmotnostních. Výsledky vyhodnocení experimentálních dat mocninovým modelem jsou uvedeny v tab. 3.11.

Tab. 3.11 Parametry mocninového modelu v závislosti na různých geometriích kapiláry, (kolagen, obsah sušiny 9,5 % hm.), rozsah smykových rychlostí (1500 - 5000 s^{-1}), τ_w počítáno pro konstantní smykovou rychlost 1000 s^{-1} [Skočilas, 2017]

	H/W = 0,05			*H/W* = 0,10			*H/W* = 0,20		
	n	*K*	τ_w	*n*	*K*	τ_w	*n*	*K*	τ_w
	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]	[-]	[Pa.s^n]	[Pa]
Hodnota	0,161	8700	26456	0,275	850	5681	0,283	990	6993
Směrodatná odchylka	0,073	3400	-	0,016	85	-	0,050	330	-

V případě kapiláry *H/W* = 0,05 byl odpor vůči toku hmoty tak vysoký, že hydraulická jednotka nebyla schopna zkoumaný materiál protlačit kapilárou (historická hydraulická jednotka, jejíž štítkové hodnoty neodpovídají současným skutečným parametrům). I přesto jsem vyhodnotil těch několik málo experimentů a výsledná data uvádím v tab. 3.11.

Z tab. 3.10 je zřejmé, že index toku materiálu se výrazně nemění s geometrií kapiláry, stejně jako v předchozích experimentech a koeficient konzistence roste s rostoucím geometrickým parametrem průřezu kapiláry *H/W* (tedy s rostoucí šířkou kapiláry).

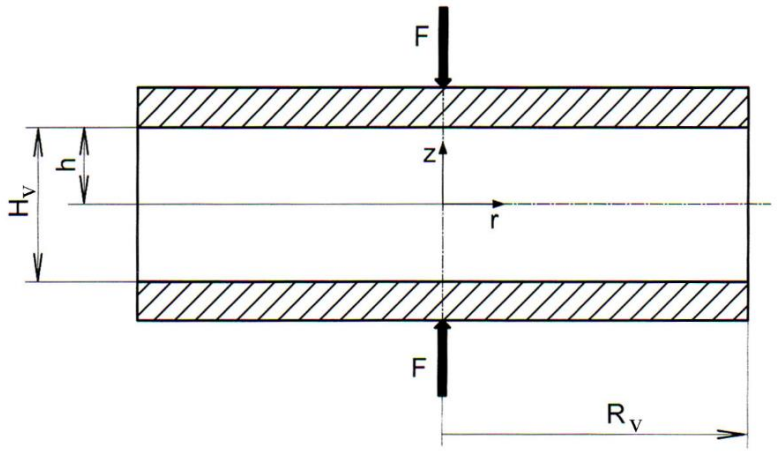
Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že pro měřené vzorky a použité geometrie jsem nalezl parametry reologický modelů, konkrétně pro mocninový model indexu toku v rozsahu n = 0,22 – 0,28; koeficient konzistence K = 490 – 2800 Pa.s^n. Pro model Herschel – Bulkley potom index toku n = 0,29 – 0,39; koeficient konzistence K = 473 – 960 Pa.s^n a mez toku τ_y = 938 – 4000 Pa. Veliký rozptyl hodnot koeficientu konzistence je způsoben zřejmě změnou koncentrace sušiny ve hmotě a také geometrickým parametrem κ použitých kapilár.

V případě modelu Herschel – Bulkley jsou směrodatné odchylky nalezených parametrů vysoké. Zřejmě tedy tento model nebude vhodný pro vyhodnocení chování vyšetřované kapaliny. Ačkoliv kolagenní hmota při prvním zkoumání vykazuje mez toku, není jednoznačné, zda její hodnota leží ve stanoveném intervalu, vzhledem ke statickým údajům naměřených hodnot a zřejmě bude nutné do budoucna nalézt jiný způsob měření meze toku nebo použít jiný model.

Také jsem zkoumal viskoelasticitu hmoty modelem popisujícím závislost napětí na stěně a výstupním tlakem z kapiláry. Tento model byl navržen ve formě mocninové závislosti, kdy parametry modelu byly nalezeny v intervalu m = 1,1 – 4,8 a K_e = (4 – 11).10^{-11} Pa$^{1/m}$. Ačkoliv směrodatné odchylky, obzvláště v případě koeficientu K_e, jsou vysoké, lze vzhledem k dosaženým hodnotám parametrů konstatovat, že pro použité operační parametry experimentálního zařízení jsou viskoelastické efekty zkoumané hmoty relativně malé. Hlavní problém při měření dané hmoty se zdá být hlavně v tom, že se materiál chová více jako pevná látka než kapalina a při plnění do reometru se nelze vyhnout vzniku vzduchových kapes (při současné konstrukci reometru), které při protlačení kolagenní hmoty kapilárou vytváří vzduchové bubliny. Ty způsobují značné oscilace měřených tlakových profilů, které v případě validace experimentálního zařízení použitím medu, nebyly zaznamenány.

3.3.2 MĚŘENÍ RADIÁLNÍM VYTĚSŇOVACÍM TOKEM

Jednou z dalších možností rozšíření vědomostí o chování kolagenní hmoty a hlavně jejích viskoelastických vlastnostech jsou experimenty s reometrem umožňujícím radiální vytěsňovací tok (squeezing flow). V rámci těchto experimentů jsem zpracoval metodiku měření a společně s kolegy jsem provedl měření, která jsem poté vyhodnotil a výsledky uvádím v této kapitole.



Obr. 3-17 Schéma radiálního vytěsňovacího toku [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

Jedná se pohyb látky mezi dvěma deskami, které jsou k sobě stlačovány. Výsledné reologické vlastnosti jsou stanoveny na základě měření axiální síly působící na pohyblivou desku (druhá protilehlá deska se nehýbe), tloušťky mezery mezi deskami a rychlosti pohybující se desky. Přehled možných řešení tohoto toku uvádí [Steffe, 1996; Corvalan, 2006; Landfeld, Skočilas, et al 2015]. První rozdíl normálových napětí lze aproximovat mocninovým modelem. Tento model pro radiální vytěsňovací tok viskoelastické látky uvádí [Brahoň, 1989]. Tato práce však nebere v úvahu skluz po stěně při pohybu látky, kde by převládaly viskoelastické efekty [Laun, 1999]. Cílem výzkumu bylo tedy popsat chování kolagenní hmoty při radiálním vytěsňovacím toku za přítomnosti částečného skluzu látky po stěně, který byl zajištěn nalepením teflonové fólie na stěny měřicí cely.

Pro popis radiálního vytěsňovacího toku látky je třeba odvodit vztahy, v nichž budou obsaženy závislosti měřených veličin, jako je rychlost pohybující se desky nebo celková axiální síla působící na desky. Geometrie měřeného případu je uvedena na obr. 3-17.

Dle schématu, se předpokládá cylindrický souřadný systém, jehož počátek je umístěn do poloviny výšky mezery mezi deskami. V rámci řešení kinematiky toku se zanedbávají setrvačné a gravitační síly. Dále se předpokládá, že radiální rychlost je závislá jak na radiální tak i na axiální souřadnici $u_r = u_r(r,z)$, ale axiální složka rychlosti jen na axiální souřadnici $u_z=u_z(z)$. Izotropický tlak ve vzorku je potom závislý jen na radiální souřadnici $p=p(r)$. Těmito zjednodušeními lze usnadnit odvození následujících vztahů.

Bilance hmotnosti v materiálovém objemu [Bird, 2007]

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{3.43}$$

kde první člen rovnice se nazývá materiálová derivace a lze ji vyjádřit vztahem

$$\frac{D\rho}{Dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla)\rho \tag{3.44}$$

tato rovnice pro ustálený stav a nestlačitelnou tekutinu přejde do tvaru

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{3.45}$$

nebo ve složkovém tvaru

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{3.46}$$

Rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu pro nulovou rychlost $v_\varphi = 0$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial (ru_r)}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \tag{3.47}$$

Pokud tedy budeme předpokládat, že axiální složka rychlosti (měřená veličina) závisí pouze na axiální souřadnici, výsledkem rovnice kontinuity pro radiální rychlost bude

$$u_r(r,z) = rg(z) \tag{3.48}$$

kde *g(z)* je hledaná funkce, na které budou závislé jak obě složky rychlosti, tak rychlost deformace. Funkci *g(z)* lze definovat z rovnice kontinuity takto

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = 2g(z) \tag{3.49}$$

Navržené řešení rovnice kontinuity ve tvaru rovnice (3-48) není nic jiného, než aproximace závislosti radiální rychlosti na souřadnicích, která má výhodu v tom, že tenzor rychlosti deformace a normálová napětí τ_{rr} a τ_{zz} jsou nezávislé na radiální souřadnici. Jen tlak je závislý na radiální souřadnici.

Obecně budeme vycházet z rovnováhy sil v systému [Bird, 2007]

$$\rho\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla\cdot\vec{\vec{\tau}} + \rho\vec{f_o} \tag{3.50}$$

kde první člen představují setrvačné síly, druhý člen rovnice jsou tlakové síly, třecí člen síly vazkého tření a poslední člen jsou síly objemové. Symbol $\vec{f_o}$ představuje vektor pole objemových sil. Rovnice rozepsaná pro složku v radiálním směru potom lze vyjádřit vztahem

$$\begin{aligned}\rho\left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\varphi}{r}\frac{\partial u_r}{\partial \varphi} - \frac{\partial u_\varphi^2}{\partial r} + u_z\frac{\partial u_r}{\partial z}\right)\\ = \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} - \frac{\tau_{\varphi\varphi}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \rho f_r\end{aligned} \tag{3.51}$$

Hledaná funkce *g(z)* může být stanovena na základě bilance hybnosti v radiálním směru, kterou lze zjednodušit do tvaru rovnice (3.52) za předpokladu zanedbání setrvačných sil a radiálních normálových napětí (toto ovšem platí jen pro čistě viskózní kapalinu, pro viskoelastickou kapalinu je toto zjednodušení pouhou aproximací)

$$-\frac{dp}{dr} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0 \tag{3.52}$$

Smykové chování kapaliny lze popsat mocninovým modelem

$$\tau_{rz} = K\dot{\gamma}_{rz}^n \tag{3.53}$$

kde smyková rychlost deformace je definována derivací

$$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} \tag{3.54}$$

Následně lze bilanci hybnosti integrovat dle souřadnice *z*

$$\frac{dp}{dr} z = \tau_{rz} = K \left(\frac{\partial u_r}{\partial z}\right)^n = K \left(r \frac{dg}{dz}\right)^n \tag{3-55}$$

Tato rovnice může být integrována podle radiální souřadnice s výsledkem obecného vyjádření radiálního profilu tlaku

$$p(r) = A_p + B_p r^{n+1} \tag{3.56}$$

kde parametry A_p a B_p jsou konstanty nezávislé na souřadnicích *r* i *z*. Po dosazení obecného radiálního profilu tlaku (3.56) do bilance hybnosti (3.52) lze vyjádřit konstantu B_p následující rovnicí

$$B_p = \frac{K}{(n+1)} \left(\frac{dg}{dz}\right)^n \tag{3.57}$$

Vzhledem k tomu, že je B_p je konstantou, rovnice (3.57) je vlastně obyčejnou diferenciální rovnicí pro fci *g(z)*, kterou lze integrovat s výsledkem

$$g(z) = \frac{u_s}{R_V} - n(n+1)^{\frac{1}{n}-1} \left(\frac{B_P}{K}\right)^{\frac{1}{n}} (h^{1+\frac{1}{n}} - z^{1+\frac{1}{n}}) \tag{3.58}$$

Tato rovnice splňuje okrajové podmínky pro *z* = 0 (symetrie) a pro *z* = *h*, kde je definována rychlost skluzu na stěně u_s, tedy radiální složka rychlosti na poloměru R_V a povrchu disku (stěny). Hledaná funkce *g(z)* je nyní definována rovnicí (3.58), kde se však vyskytuje neznámá konstanta B_p. Tu lze stanovit z rovnice kontinuity (3.49) integrací dle *z* pro okrajovou podmínku, kde axiální rychlost je definována jako časová změna vzdálenosti desek (měřeno) $u_z(h) = dh/dt$

$$B_P = -\left[\left(\frac{dh}{dt}\right) \frac{(1-2\delta)(2n+1)}{2n}\right]^n \frac{K}{(n+1)h^{2n+1}} \tag{3.59}$$

kde parametr δ nahrazuje rychlost skluzu na stěně u_s, dle definice [Laun, 1999]

$$\delta = \frac{h u_s}{\left(-\frac{dh}{dt}\right) R_V} \tag{3.60}$$

kde hodnota $\delta = 0$ představuje nulovou rychlost skluzu po stěně a hodnota $\delta = 0{,}5$ odpovídá dokonalému mazání, tedy rovnoměrný radiální tok vzorku, popsaný radiální rychlostí u_r, která je nezávislá na *z*. Potom rovnice (3-58) a (3.59) reprezentují kompletní kinetiku pohybu vzorku, tedy axiální rychlostní profil [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

$$u_z = \left(-\frac{dh}{dt}\right) \left\{ -\frac{2n+1}{n+1} (1-2\delta) \left[\frac{z}{h} - \frac{n}{2n+1} \left(\frac{z}{h}\right)^{2+\frac{1}{n}}\right] - 2\delta \frac{z}{h} \right\} \tag{3.61}$$

Tato rovnice se drasticky zjednoduší pro ideální skluz $\delta = 0{,}5$

$$u_z = \left(-\frac{dh}{dt}\right)\left(-\frac{z}{h}\right) \tag{3.62}$$

Radiální rychlostní profil lze definovat, [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

$$u_r = rg(z) = \frac{r}{h}\left(-\frac{dh}{dt}\right)\left\{\delta + \frac{2n+1}{2(n+1)}(1-2\delta)\left[1-\left(\frac{z}{h}\right)^{1+\frac{1}{n}}\right]\right\} \tag{3.63}$$

a opět pro ideální skluz $\delta = 0{,}5$

$$u_r = \left(-\frac{dh}{dt}\right)\frac{r}{2h} \tag{3.64}$$

Rychlost smykové deformace ve vzdálenosti R_V od počátku souřadnic [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

$$\dot{\gamma}_R = \left.\frac{\partial u_r}{\partial z}\right|_{R_V,z} = \frac{2n+1}{3n}\left[\frac{3R_V}{H_V^2}\left(-\frac{dh}{dt}\right)\right](1-2\delta) \tag{3.65}$$

Pro ideální skluz $\delta = 0{,}5$ je rychlost smykové deformace nulová. Z výše uvedeného odvození vyplývá důležitá vlastnost navrženého modelu a to, že kinetika toku látky závisí pouze na smykových reologických parametrech (n a K) a v případě ideálního skluzu, tedy ideálního mazání mezi kapalinou a povrchem stěny, je tok nezávislý na materiálových vlastnostech látky (za předpokladu nestlačitelné látky.)

Druhou veličinou, která se zaznamenává v průběhu experimentu, je celková síla působící na desky. I pro ni je nutné na základě teorie odvodit vztah, z něhož by bylo možno získat viskoelastické vlastnosti materiálu.

Celková axiální tlaková síla působící na horní desku může být definována jako součet smykové a elongační síly, která odpovídá stavu ideálního skluzu, tedy $\delta = 0{,}5$. Celkovou sílu můžeme definovat vztahem

$$F = 2\pi\int_0^{R_V}[p - p_a + \tau_{zz}(h)]rdr = 2\pi\int_0^{R_V}\left[A_p + B_p r^{n+1} - p_a + \tau_{zz}(h)\right]rdr \tag{3.66}$$

kde celková síla je dána součtem

$$F = F_S + F_E \tag{3.67}$$

Konstanta B_p je již definována rovnicí (3.59). Potom neznámou konstantu A_p mohu definovat dle okrajové podmínky na volném povrchu kapaliny $r = R_V$, kde by měl být atmosférický tlak v rovnováze s celkovým napětím ve stlačovaném vzorku. Celkové napětí je součet vnitřního tlaku $p(R_V)$ a normálového napětí $\tau_{rr}(R_V,z)$. Bilance napětí na volném povrchu vzorku

$$A_p + B_p R_V^{n+1} + \tau_{rr}(z) = p_a \tag{3.68}$$

Zde však nelze přesně dodržet okrajovou podmínku, neboť τ_{rr} je závislé na z, což je způsobeno zjednodušujícími předpoklady. Radiální napětí v místě $z = 0$, je zde přijato aproximací, tedy radiální tlakový profil potom bude

$$p = p_a - B_p(R_V^{n+1} + r^{n+1}) - \tau_{rr}(0) \tag{3.69}$$

Výslednou rovnici pro celkovou axiální sílu získáme dosazením rovnice (3.68) do rovnice (3.66)

$$F = 2\pi \int_0^R \left[-B_p(R_V^{n+1} - r^{n+1}) - \tau_{rr}(0) + \tau_{zz}(h)\right] r\, dr \tag{3.70}$$

a po integraci

$$F = \pi\left(-B_p\right) R_V^{n+3} \frac{n+1}{n+3} + \pi R_V^2 [\tau_{zz}(h) - \tau_{rr}(0)] \tag{3.71}$$

Neznámou konstantu B_p můžeme eliminovat z rovnice (3.70) dosazením rovnice (3.59) a v případě, že jsou normálová napětí zanedbatelná a na kontaktní ploše není ideální skluz, tedy $\delta < 1/2$, platí [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

$$F_s = \left(-\frac{dh}{dt}\right)^n \frac{1}{h^{2n+1}} \left(\frac{2n+1}{2n}\right)^n \frac{\pi K R_V^{n+3}}{n+3} (1 - 2\delta)^n \tag{3.72}$$

Elongační sílu lze získat z rozdílu normálových napětí v axiálním a radiálním směru. Ačkoliv by se mohlo zdát, že se jedná o první rozdíl normálových napětí, není tomu tak. Elongační chování kolagenní hmoty může být popsáno analogicky mocninovým modelem

$$\tau_{zz} = -2K_e \dot{\varepsilon}_{zz}^m \tag{3.73}$$

kde $\dot{\epsilon}_{zz}$ je elongační rychlost deformace v axiálním směru, která může být stanovena z mocninového modelu rychlostního profilu odpovídajícího chování smykovému toku popsaného indexem toku *n*. Vztahy mezi elongační rychlostí deformace a elongačním napětím v různých směrech jsou definovány rovnicemi

$$\dot{\varepsilon}_{rr} = -\frac{\dot{\varepsilon}_{zz}}{2} \tag{3.74}$$

a pro napětí

$$\tau_{rz} = -\frac{\tau_{zz}}{2} \tag{3.75}$$

Pro definování elongační síly použijeme vztahy (3.74) a (3.75) a po dosazení

$$F_E = \pi R_V^2 [\tau_{zz}(h) - \tau_{rr}(0)] = \pi R_V^2 [-2\dot{\varepsilon}_{zz}^m(h) - \dot{\varepsilon}_{zz}^m(0)] \tag{3.76}$$

kde rychlost elongační deformace ve vzdálenosti *h* od roviny symetrie

$$\dot{\varepsilon}_{zz}(h) = -\frac{2\delta}{h}\left(-\frac{dh}{dt}\right) \tag{3.77}$$

a v rovině symetrie $h = 0$

$$\dot{\varepsilon}_{zz}(0) = -\frac{3}{2h}\left(-\frac{dh}{dt}\right)\left\{(1-2\delta)\frac{2}{3}\frac{(2n+1)}{n+1}+\frac{4}{3}\delta\right\} \tag{3.78}$$

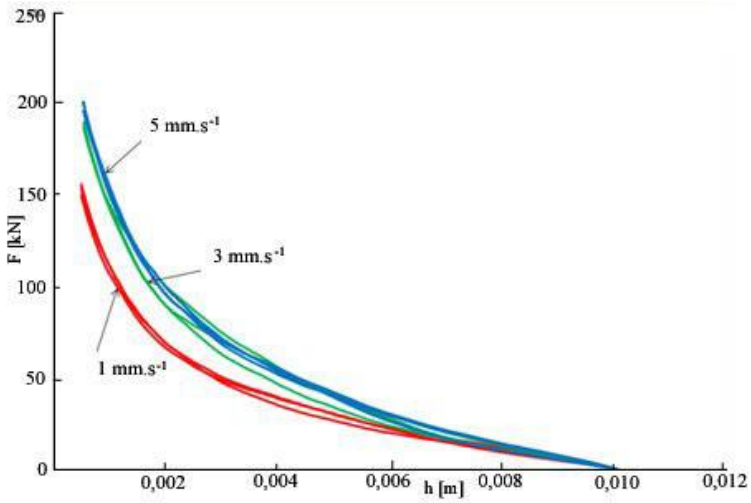
a konečný vztah pro elongační sílu dostaneme dosazením rovnic (3.77) a (3.78) do rovnice (3.76), kde po úpravách [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

$$F_E = \pi R_V^2 K_e \left[\frac{3}{2h}\left(-\frac{dh}{dt}\right)\right]^m \left\{2\left(\frac{4\delta}{3}\right)^m + \left[-\frac{4\delta n + 2(2n+1)}{3(n+1)}\right]^m\right\} \tag{3.79}$$

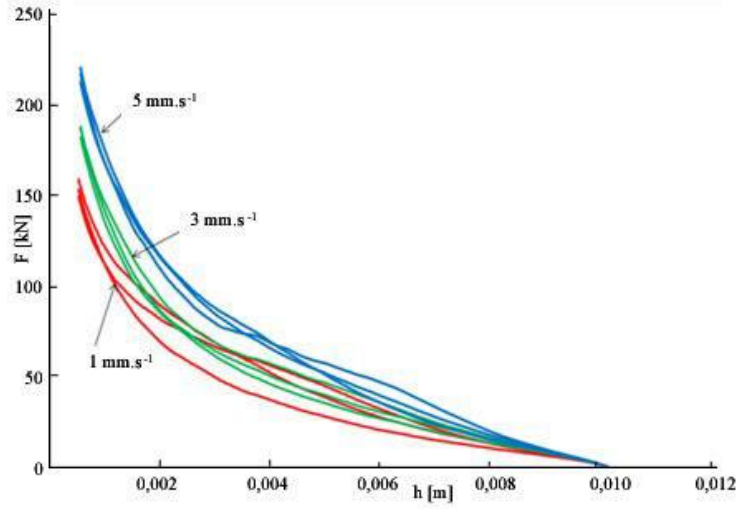
Tento odvozený model se liší od modelu navrženého autory Laun [Laun, 1999] tím, že jsou použity mocninové modely jak pro smykový, tak pro elongační tok (exponenty *n* a *m*).

Provedení experimentu předcházela specifická příprava vzorku. K měření byla použita hovězí kolagenní hmota s obsahem sušiny 7,2 % hmotnostních. Každý vzorek vážil přibližně 60 g, a bylo ho nutno oddělit od celkové kolagenní masy. Vzorek byl prohněten a poté stlačen do požadovaného tvaru válce o průměru 55 mm a výšky 22 mm. Měření probíhalo při dvou různých teplotách 10 a 20 °C. Před vlastním měřením byly všechny vzorky připraveny najednou, zavakuovány do plastikových sáčků a ochlazeny na požadovanou teplotu v termostatu.

Pro vlastní experimenty radiálního vytlačovacího toku bylo použito speciální zařízení TA-XT2i (Stable Micro System, Anglie). Horní deska má průměr 49 mm, spodní má tvar čtverce o straně 100 mm. Na obě plochy byly přilepeny teflonové fólie, které mají zajistit ideální skluz po stěně. Pro stlačení vzorků byly použity tři rychlosti pohybu horní desky 1, 3 a 5 mm.s^{-1}. Experiment byl zastaven ve chvíli, kdy bylo dosaženo 97,5 % deformace, tedy pro počáteční tloušťku vzorku 20 mm je to vzdálenost desek 0,5 mm. Při pohybu desky byla současně zaznamenávána síla na horní desku, výška od spodní desky a čas. Experimenty pro každou rychlost pohybu byly opakovány třikrát.



Obr. 3-18 Závislost síly na vzdálenosti desek při radiálním vytlačovacím toku, teplota 10 °C [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

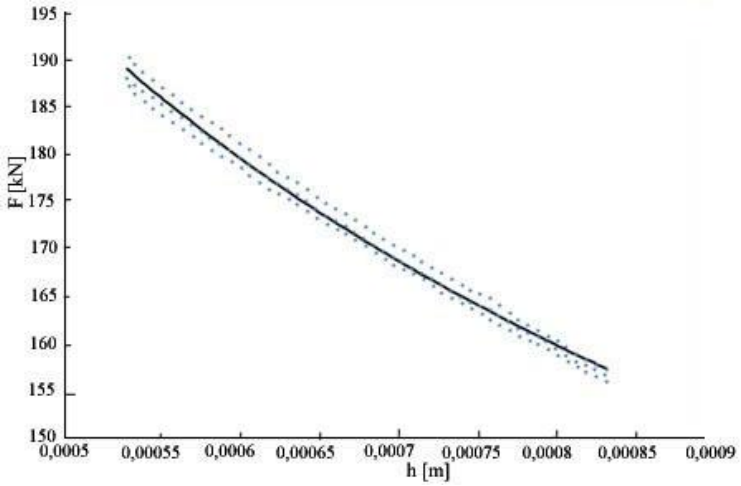


Obr. 3-19 Závislost síly na vzdálenosti desek při radiálním vytlačovacím toku, teplota 20 °C [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

Pro nelineární regresi parametrů modelu byl použit program DataFit (Oakdale Engineering, USA). Index smykového toku mocninového modelu byl převzat z experimentů s kapilárním reometrem. Pro predikci parametrů *Ke* a *m* byla nakonec použita jen data v rozsahu deformací 91 % až 95 % odpovídající stejnému rozsahu smykových deformací na kapilárním reometru. Druhým důvodem pro zúžení intervalu vyhodnocení bylo omezení rovnice (3.79) pro relativně malé hodnoty tloušťky vzorku.

Naměřená data závislosti síly závislosti síly na vzdálenosti desek pro všechny rychlosti a dvě teploty jsou uvedena na obr. 3-18 a 3-19.

Z obr. 3-18 a 3-19 je patrný malý rozptyl hodnot z opakovaných měření. To je zřejmě způsobeno přípravou vzorku a jeho nedokonalou homogenitou. Je patrná jednoznačná závislost klesající síly na klesající rychlosti zatěžování. Obr. 3-20 ukazuje typický příklad zpracování experimentálních dat nelineární regresí pro rychlost stlačování 3 mm.s^{-1} a teplotu vzorku 10 °C. Experimentální data jsou zde popisována rovnicí (3.79) resp. (3.73) a z obr. 3-20 je zřejmá dobrá shoda mezi experimentem a modelem.



Obr. 3-20 Nelineární regrese naměřených dat pro rychlost stlačování 3 mm.s^{-1} a teplotu vzorku 10 °C, body představují naměřená data, plná čára model [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

Výsledky nelineární regrese pro všechna experimentální data jsou shrnuta v tab. 3.12, kde je vidět, že pro 10 °C hodnoty parametrů mírně klesají, nicméně pro 20 °C nejsou systematické.

Tab. 3.12 Parametry mocninového modelu pro elongační sílu popsanou rovnicí (3.79), pro různé teploty a rychlosti stlačování, [Landfeld, Skočilas, et al 2015]

Teplota	**10 °C**			**20 °C**		
Rychlost stlačování	1 mm/s	3 mm/s	5 mm/s	1 mm/s	3 mm/s	5 mm/s
m [-]	0.447	0.416	0.400	0.428	0.442	0.389
K_e [Pa.s^m]	20126.8	16358.1	14439.5	20070.4	15236.7	15914.4
R^2 [-]	0.85	0.99	0.98	0.82	0.92	0.92

Ze statistické analýzy, která byla provedena programem QC Expert 3.1 (TriloByte, ČR)vyplývá, že vliv teploty a rychlosti zatěžování je statisticky nevýznamný [Landfeld, Skočilas, et al 2015].

3.4 ELEKTRICKÉ A TEPELNÉ VLASTNOSTI KOLAGENNÍ HMOTY

Kromě tokových vlastností kolagenní hmoty byly také studovány termodynamické a elektrické vlastnosti, tedy měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost a měrná elektrická vodivost [Štancl, Skočilas, et al 2017]. Tyto experimenty byly provedeny mými spolupracovníky a studenty, na základě mého návrhu konceptu metodiky měření.

Tyto vlastnosti jsou důležité z hlediska návrhu strojního zařízení, především při regulaci teploty materiálu, který je na teplotu citlivý (denaturace kolagenu). Na základě znalostí těchto vlastností je možno navrhnout chlazení nebo ohřev, případně dopočítat teplotní distribuci uvnitř zpracovávaného materiálu. Elektrickou vodivostí se příliš mnoho autorů nezabývalo, nicméně pokud by se například prokázala závislost mezi měrnou elektrickou vodivostí a reologickými vlastnostmi kolagenu, z konstrukčního hlediska by bylo možno navrhnout zařízení – elektroreometr, který by měřil tokové vlastnosti na základě měření elektrických veličin zkoumané látky. To bylo jednou z motivací, proč zjišťovat elektrické vlastnosti kolagenního materiálu.

Pro měření byla použita hovězí kolagenní hmota o obsahu sušiny 7,2 % hmotnostních. Tato hmota obsahuje frakce molekul členěné podle hmotnosti na 12 % lehké frakce 3 kDa, 15 % střední frakce 550 kDa a 19 % těžké frakce 780 kDa, což bylo zjištěno vylučovací chromatografií (SEC) [Žitný, Skočilas, et al 2016]. Pro tři různé typy experimentů byly připraveny tři různé velikosti vzorků. Pět vzorku o rozměrech 85 mm (průměr) a 15 mm (výška) bylo připraveno pro měrnou elektrickou vodivost, což odpovídá velikosti měřicí cely. Pět vzorků bylo připraveno pro měření na diferenčním skenovacím kalorimetru o hmotnosti přibližně 15 - 25 mg, dle maximálního objemu pouzdra, ve kterém se vzorky vkládají do kalorimetru. Pět vzorků bylo připraveno ve formě kvádru o rozměrech 150x100x20 mm pro měření tepelné vodivosti.

Měření měrné elektrické vodivosti probíhalo na vlastním zařízení, které se skládalo z měřicí cely, vybavené dvěma plochými elektrodami a termočlánkem pro měření teploty vzorku v jeho geometrickém středu. Elektrody byly napájeny z audiozesilovače Q1212 (Electrovoice, Německo) a generátoru sinusových vln (Wavetek, USA). Vzorek byl ohmicky ohříván, tzn., že byla zjištěna závislost měrné elektrické vodivosti na teplotě vzorku. Po kalibraci zařízení, která měla zjistit optimální frekvenci elektrického pole, a tím snížit chybu měření vlivem polarizace vysoce vodivých materiálů, byla tato frekvence stanovena na hodnotu 2,5 kHz. Měření měrné

tepelné kapacity bylo provedeno na diferenčním skenovacím kalorimetru (Perkin-Elmer Diamond, USA), který také umožňuje sledovat závislost měřené veličiny na teplotě. Pro měření tepelné vodivosti bylo použito zařízení Kemtherm QTM-D3 (Kyoto Electronics, Japonsko). Tento přístroj neumožňuje nastavovat teplotu vzorku. Tepelná vodivost byla změřena pro teplotu vzorku 13 °C.

Výsledky měření měrné elektrické vodivosti společně s měrnou tepelnou kapacitou jsou zaznamenány na obr. 3-21. Pro popis závislosti měrné elektrické vodivosti na teplotě byl použit vztah

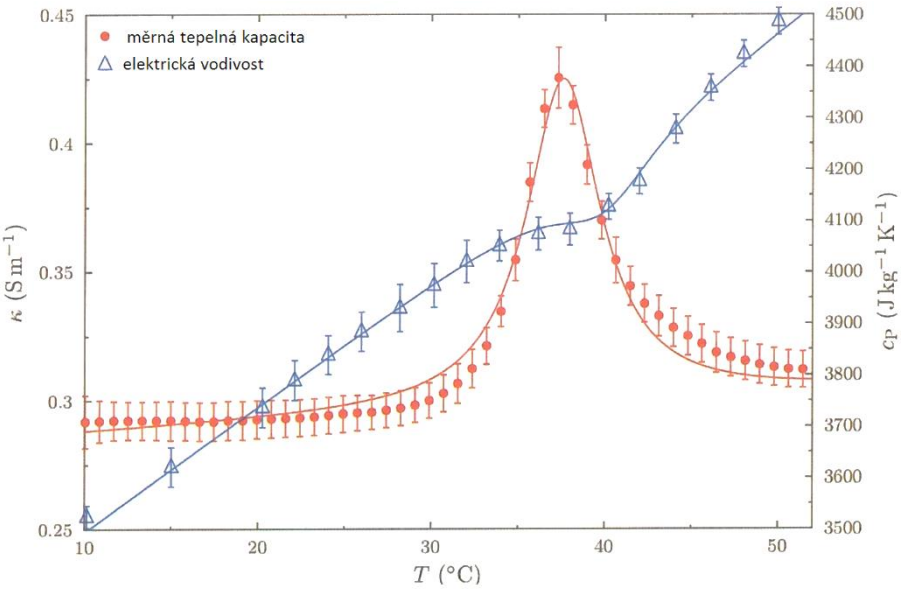
$$\kappa_e = a_k + b_k T + \frac{c_k}{1 + d_k (T - e_k)^2} \tag{3.80}$$

Standardní směrodatná odchylka měřené měrné elektrické vodivosti je 0,008 S.m^{-1}. Z obr. 3-21 je zřejmé, že elektrická vodivost silně závisí na teplotě. Korelační koeficient modelu s experimentálními daty je R^2 = 0,999. Zároveň byla provedena statistická analýza významnosti jednotlivých parametrů modelu (3.80). Ze změřeného trendu je vidět slabý pokles hodnoty elektrické vodivosti v rozmezí teplot 32 – 43 °C. Tato oblast odpovídá denaturaci kolagenu.

Stejná závislost byla použita i pro měrnou tepelnou kapacitu, dle rovnice (3.81)

$$c_p = a_c + bT + \frac{c_c}{1 + d_c (T - e_c)^2} \tag{3.81}$$

Korelační koeficient modelu s experimentálními daty je R^2 = 0,975. Z průběhu měření je zřejmý vrchol závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě. Ten právě odpovídá oblasti, kdy dochází k denaturaci kolagenu, který se mění v želatinu. Také u modelu (3.81) byla provedena statistická analýza významnosti jednotlivých parametrů. Z ní vyplývá, že všechny parametry obou modelů jsou statisticky významné, tzn. teplota má významný vliv jak na měrnou elektrickou vodivost, tak na měrnou tepelnou kapacitu. Výsledky nelineární regrese jsou uvedeny v tab. 3.13.



Obr. 3-21 Závislost elektrické vodivosti (trojúhelníky) a měrné tepelné kapacity (plné body) na teplotě vzorku. V grafu jsou uvedeny průměrné hodnoty z opakovaných experimentů. Plné čáry představují modely [Štancl, Skočilas, et al 2017].

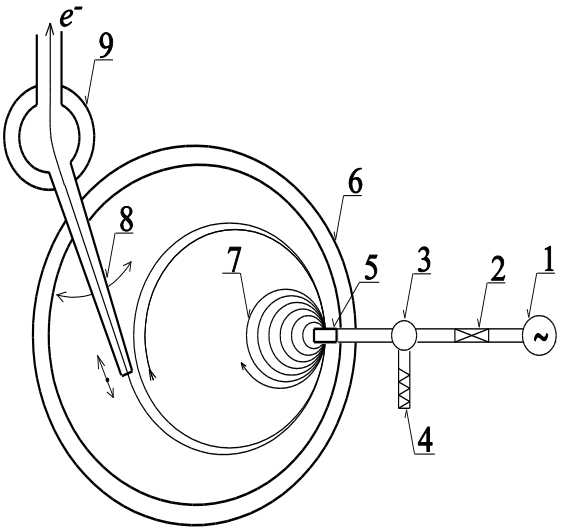
Tab. 3.13 Parametry modelu měrné tepelné kapacity a měrné elektrické vodivosti platné v rozsahu teplot 10 – 50 °C [Štancl, Skočilas, et al 2017].

Měrná elektrická vodivost			Měrná tepelná kapacita		
Parametry	**Hodnoty**	**Jednotky**	**Parametry**	**Hodnoty**	**Jednotky**
a_k	0,2001	[S.m^{-1}]	a_c	3665,1000	[J.kg^{-1}.°C^{-1}]
b_k	0,0049	[S.m^{-1}.°C^{-1}]	b_c	2,0179	[J.kg^{-1}.°C^{-2}]
c_k	-0,0228	[S.m^{-1}]	c_c	634,6700	[J.kg^{-1}.°C^{-1}]
d_k	0,0774	[°C^{-2}]	d_c	0,14712	[°C^{-2}]
e_k	40,0000	[°C]	e_c	37,614	[°C]

Teplená vodivost hmoty byla stanovena měřením na střední hodnotu 0,642 W.m^{-1}.°C^{-1} se směrodatnou odchylkou 0,073 W.m^{-1}.°C^{-1}, pro teplotu vzorku 13 °C. Tato hodnota je tedy značně ovlivněna obsahem vody ve vzorku. Z měření měrné tepelné kapacity byly získané teploty začátku a konce denaturace kolagenu, a to v rozmezí 33,7 až 43,4 °C. Velmi podobné výsledky vykazovalo měření elektrické vodivosti 32,8 až 42,5 °C. Pro orientační měření počáteční teploty želatinizace lze tedy použít i experimentální zařízení pro měření měrné elektrické vodivosti [Štancl, Skočilas, et al 2017].

3.5 ZMĚNA FYZIKÁLNÍCH VLASTNOSTÍ KOLAGENU PŮSOBENÍM ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ

V případě potravinářských výrob se hledají možnosti modifikace suroviny dle požadavku technologie. Mohou to být například aditiva ve formě zahušťovadel nebo rozpouštědel a také vliv vnějších podmínek, nejčastěji přestupu tepla (ať se jedná o chlazení nebo ohřev), působení infračerveného nebo ultrafialového záření, elektrického či elektromagnetického pole a dalších. Jednou z možností, jak ovlivnit strukturu a vlastnosti biopolymerů je působení elektromagnetického záření [Grant, 1970]. Proto také byly provedeny studie zaměřené na ozáření vyšetřovaného kolagenu a měření změn jeho vlastností.



Obr. 3-22 Schéma zařízení Microtron MT 25.

Legenda: 1 – magnetron, 2 – fázový měnič, 3 – cirkulátor, 4 – vodní chlazení, 5 – akcelerační cela, 6 – vakuová komora (magnet mikrotronu), 7 – oběžné dráhy elektronů, 8 – nastavitelný extraktor paprsku, 9 – první deflektor paprsku [Landfeld, Skočilas, et al 2016].

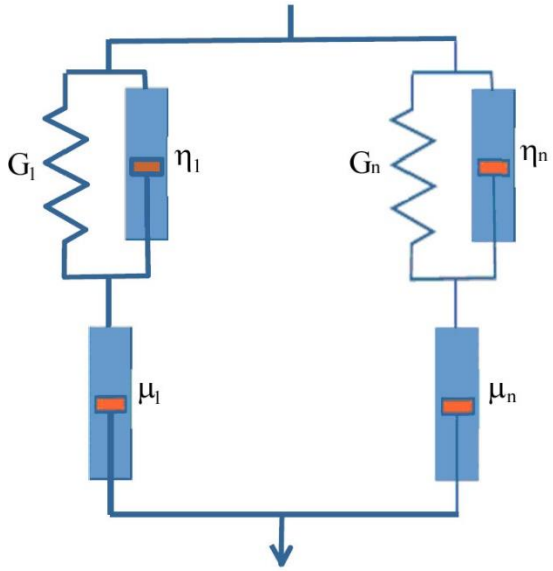
K měření byla použita kolagenní hmota o hmotnostní koncentraci sušiny 7,7 %. Ozáření vzorku proběhlo na zařízení Microtrom MT 25, umístěného v Ústavu nukleární fyziky Akademie věd ČR. Schéma zařízení je uvedeno na obr. 3-22, hlavní parametry pak v tab. 3.14.

Ozáření vzorků bylo provedeno pro frekvenci opakování radiového pulzu 423 Hz. Doba makro-pulzního proudu byla 3,5 μs, doba středního proudu urychlených elektronů byla přibližně 7,5 μs. Energie elektronů byla nastavena na 9,7 MeV. Vzorky rotovaly v elektronovém poli, rádius rotace 30,5 cm a čas otáčky 15,5 s. Vzorky byly ozářeny v polyetylenových sáčcích. Hmotnost každého vzorku byla 70 g. Pro ozařování byly použity dávky 250, 330, 400 a 500 Gy.

Tab. 3.14 Hlavní parametry Microtronu M 25 [Landfeld, Skočilas, et al 2016].

Parametr	**Hodnota**
Energie elektronu	6-25 MeV
Disperze energie	desítky keV
Počet otáček oběžné dráhy	25
Střední hodnota proudu urychlených elektronů	max. 30 μA (při 24 MeV)
Pracovní frekvence magnetronu	2796±5 MHz
Pulsní výkon magnetronu	max. 3 MW
Délka radiofrekvenčního pulzu	1 – 7 μs
Frekvence opakování radiofrekvenčního pulzu	50 – 450 Hz

Měření reologických parametrů bylo provedeno na oscilačním reometru Haake RS150 Rheostress (Thermo Scientific, Německo). Rozsah frekvence při oscilačním měření byl nastaven v rozsahu 0,1 – 1,586 Hz, s relativní deformací 4 % (stanovené na základě metody vzrůstající amplitudy v lineární oblasti deformace). Geometrie měřicího tělíska byla 35 mm průměr desky a 2 mm mezera mezi deskami. Reologická měření byla prováděna při teplotách 10, 20 a 30 °C, s opakováním každého měření čtyřikrát na novém vzorku. Výsledkem měření byly hodnoty elastického modulu *G'*, ztrátového modulu *G''* a fázového posunu δ.



Obr. 3-23 Schéma modelu vycházející z kombinace Kelvin – Voight a Maxwell [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

Měření elektrické vodivosti bylo provedeno umístěním elektrod přímo na měřicí akční prvky reometru. Oscilující horní a nepohybující se spodní deska byly zapojeny do obvodu jako elektrody. Měření elektrických veličin bylo zajištěno multifukčním přístrojem LCR meter Keysight E49800A (Keysight Technologies, Malajsie). Elektrická vodivost byla měřena při relativních deformacích vzorku 4, 10, 20 a 190 %, pro oscilační frekvenci 1 Hz a vzdáleností desek 2 mm. Elektrody byly napájeny napětím 1 V s frekvencí 10 kHz. Data byla zaznamenávána s periodou 0,05 s.

Vliv ozáření byl sledován i s ohledem na velikost makromolekul, která byla sledována pro dávky 0 (bez ozáření), 330 a 500 Gy. Z každého vzorku bylo odebráno 0,5 g a tato část byla smíchána s 10 ml kyseliny octové (0,5 M). Druhý den byl roztok vložen do ultrasonické lázně po dobu 1,5 h a následně odstředěn (5 min, 10000 min^{-1}) a filtrován (mikrofiltr, 2 μm). Separace makromolekul proběhla vylučovací chromatografii společně s UV detekcí.

Naměřená data byla podrobena statistické analýze. Pro každý měřený parametr byl vyhodnocen aritmetický průměr a směrodatná odchylka. Tři faktory měření byly hodnoceny z hlediska statistické významnosti a to teplota (10, 20 a 30 °C), dávka ozáření (0, 250, 330, 400 a 500 Gy), frekvence oscilací (0,1-1,586 Hz), která odpovídá úhlové rychlosti (0,628 – 9,954 $rad.s^{-1}$).

Pro popis viskoelastického chování kolagenní hmoty byl zvolen kombinovaný model Kelvin – Voight a Maxwell, viz obr. 3-23 [Barnes, 2000].

Závislost parametrů modelu, elastického modulu a ztrátového modulu na úhlové rychlosti je možno definovat následujícími vztahy [Barnes, 2000] - pro elastický modul

$$G' = \sum_{i=1}^{n} \frac{G_i(\omega\mu_i)^2}{{G_i}^2 + \omega^2(\mu_i + \eta_i)^2} \tag{3.82}$$

a pro ztrátový modul

$$G'' = \sum_{i=1}^{n} \mu_i \omega \frac{(\mu_i + \eta_i)\eta_i\omega^2 + G_i^2}{{G_i}^2 + \omega^2(\mu_i + \eta_i)^2} \tag{3.83}$$

Viskozita η a smykový modul G představují parametry paralelního zapojení pružiny a tlumiče, kdežto viskozita μ reprezentuje zapojení sériové. Prvním záměrem bylo použít přímo tento model. Nicméně, vzhledem k převažujícím elastickým vlastnostem kolagenní hmoty, byl použit jednoduchý dvojnásobný Maxwellův model zapojený paralelně, tedy sledované parametry byly G_1, G_2, μ_1 a μ_2, zatímco viskozity η_1 a η_2 byly ze vztahu (3.82) odstraněny (dosazovaly se nulové hodnoty). Nenulové parametry modelu byly stanoveny na základě nelineární regrese naměřených dat elastického modulu s použitím software DataFit (Oakdale Engineering, USA) a rovnice (3.82). Tyto hodnoty byly poté korelovány s teplotou a velikostí dávky záření. Ve výsledku byly nalezeny jednoduché lineární závislosti těchto parametrů statistickým programem QC Expert (TriloByte, ČR). Pro smykové moduly lze popsat závislost rovnicí [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

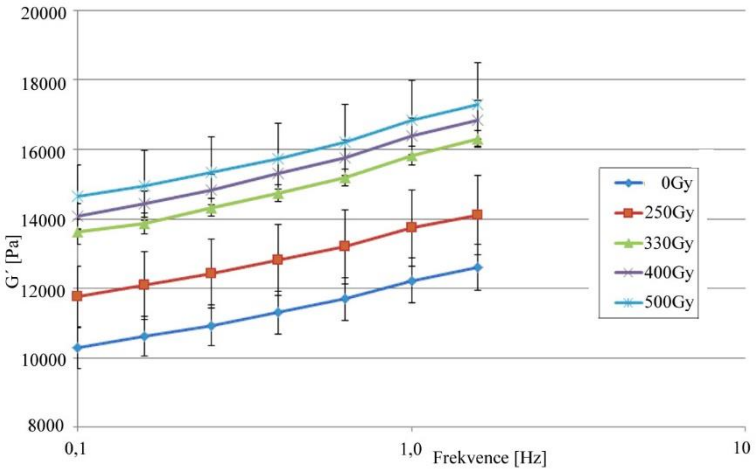
$$G_i = a_i + b_i T + c_i DI \tag{3.84}$$

a pro viskozity rovnicí [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

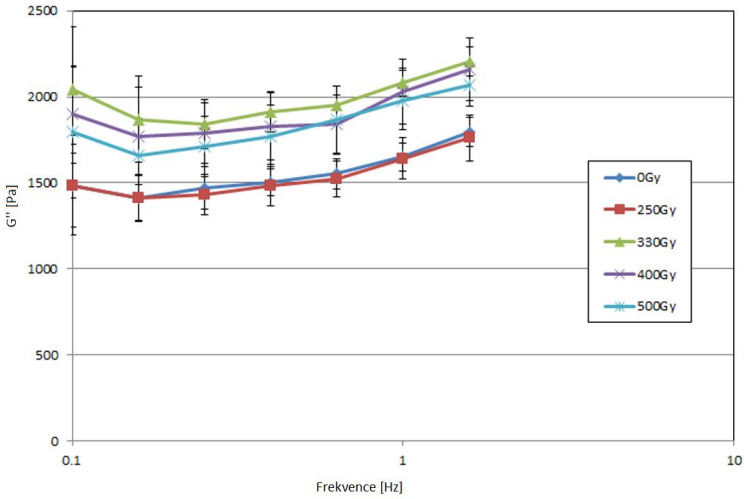
$$\mu_i = d_i + e_i T + f_i DI \tag{3.85}$$

kde T je teplota a DI velikost dávky záření. Statistická významnost každého parametru byla vyhodnocena na základě porovnání korelačních koeficientů a jejich kritických hodnot na hladinu významnosti $\alpha = 0{,}05$ a stupně volnosti 12, kde $r_{crit,24} = 0{,}532$.

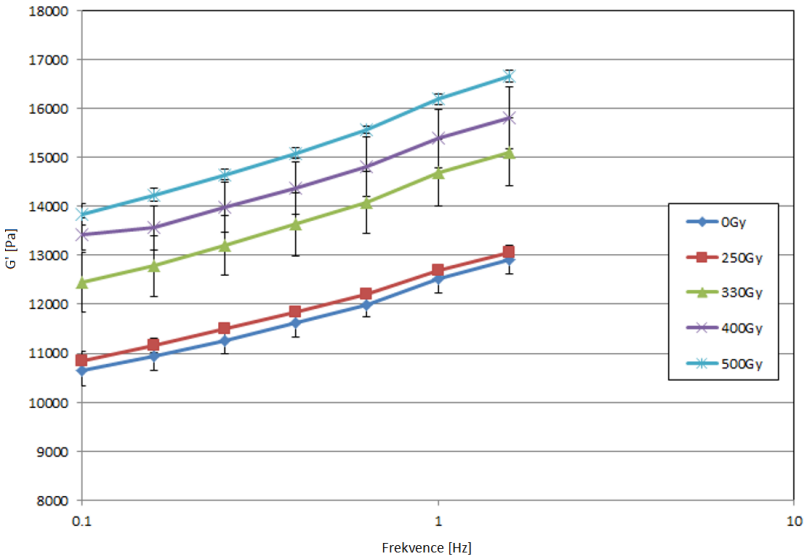
Naměřená data pro různé teploty a velikosti dávky ozáření jsou uvedena na obr. 3-24, 3-26 a 3-28 pro reálnou část elastického modulu. Z výsledků je zřejmé, že elastický modul roste s rostoucí frekvencí oscilací a s rostoucí velikostí dávky ozáření. Vliv teploty je však opačný, se zvyšující se teplotou elastický modul klesá. Ze statistické analýzy vyplývá, že všechny nastavované parametry vzorku a měření, tedy teplota, velikost ozáření a frekvence mají významný efekt na měřený elastický modul. Na obr. 3-25, 3-27 a 3-29 je zobrazena závislost imaginární části ztrátového modulu na frekvenci. Ztrátový modul vykazuje podobné chování vzhledem ke třem sledovaným parametrům, jen je přibližně osm krát menší než elastický modul. Z výše uvedených závěrů vyplývá, že se kolagenní hmota chová v rozsahu měřených frekvencí jako viskoelastické pevné těleso.



Obr. 3-24 Závislost elastického modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 10 °C [Landfeld, Skočilas, et al 2016]



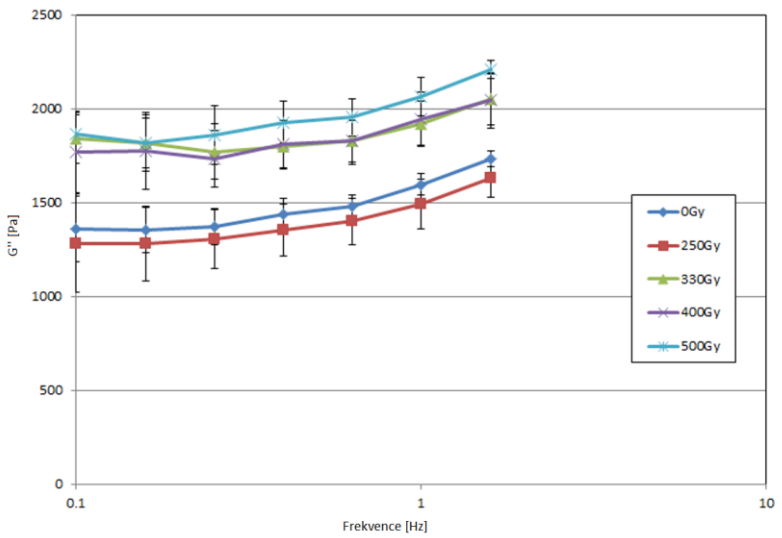
Obr. 3-25 Závislost ztrátového modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 10 °C [Landfeld, Skočilas, et al 2016]



Obr. 3-26 Závislost elastického modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 20 °C [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

Tab. 3.15 Parametry Maxwellova modelu v závislosti na teplotě a dávce ozáření kolagenní hmoty [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

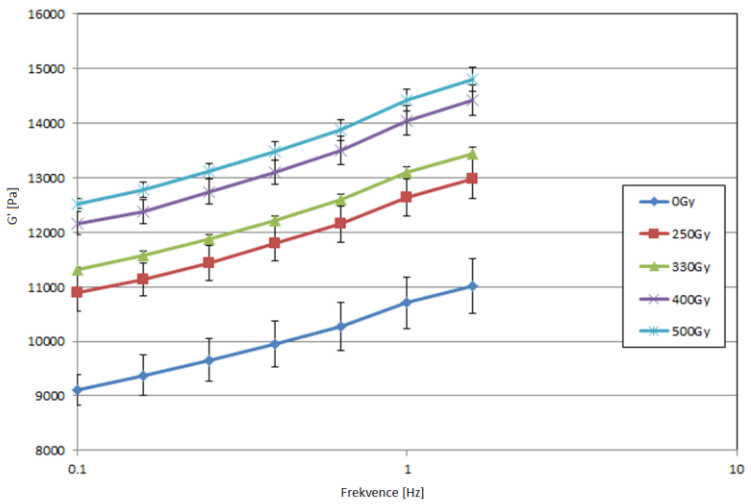
T	***DI***	G_1	G_2	μ_1	μ_2	***r***
[°C]	[Gy]	[Pa]	[Pa]	[Pa.s]	[Pa.s]	[-]
10	0	10776	2203	74031	485	0.826
10	250	12237	2197	91166	505	0.666
10	330	14048	2654	116458	610	0.965
10	400	14612	2654	110759	610	0.919
10	500	15104	2620	125212	576	0.701
20	0	11108	2174	79311	478	0.951
20	250	11354	2054	79478	452	0.990
20	330	12959	2525	94730	606	0.853
20	400	13627	2487	147308	622	0.875
20	500	14442	2652	102971	583	0.992
30	0	9505	1786	68626	411	0.871
30	250	11238	2032	91477	488	0.927
30	330	11693	2084	94713	479	0.994
30	400	12492	2262	109430	543	0.964
30	500	12898	2258	109504	519	0.982



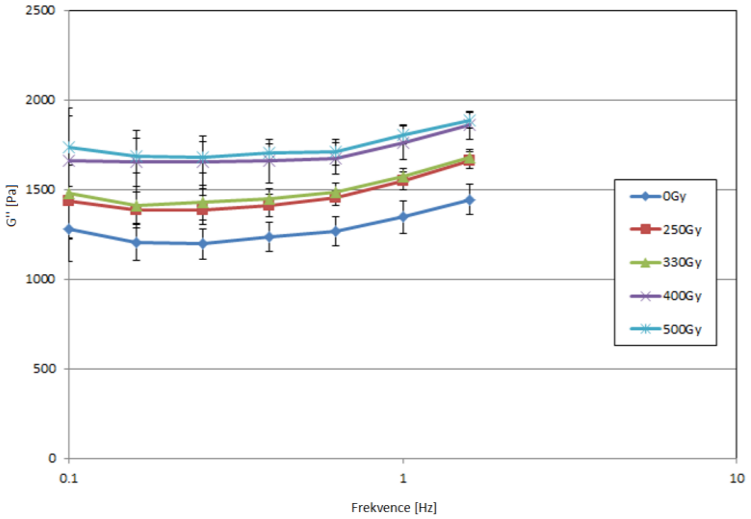
Obr. 3-27 Závislost ztrátového modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 20 °C [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

Tab. 3.16 Vyhodnocení parametrů závislostí Maxwellova modelu na teplotě a dávce ozáření [Landfeld, Skočilas, et al 2016], *) – závislost parametru μ_1 na teplotě je statisticky nevýznamná

Parametry Maxwellova modelu	**Parametry rovnic (3.84) – (3.85)**	**Hodnoty**	**Jednotky**	**Hodnota *p* (–)**	***r* (-)**
G_1	a_1	12046,00	[Pa]	0	0,959
	b_1	-89,50	[Pa.°C^{-1}]	0,0001	
	c_1	7,71	[Pa.Gy^{-1}]	0	
G_2	a_2	2388,00	[Pa]	0	0,882
	b_2	-19,06	[Pa.°C^{-1}]	0,00095	
	c_2	1,02	[Pa.Gy^{-1}]	0,00041	
μ_1	d_1	81089,20	[Pa.s]	0,00001	0,792
	e_1	-438,80	[Pa.s.°C^{-1}]	0,33543*)	
	f_1	92,40	[Pa.s.Gy^{-1}]	0,00089	
μ_2	d_2	523,70	[Pa.s]	0	0,810
	e_2	-3,46	[Pa.s.°C^{-1}]	0,02357	
	f_2	0,26	[Pa.s.Gy^{-1}]	0,00169	



Obr. 3-28 Závislost elastického modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 30 °C [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

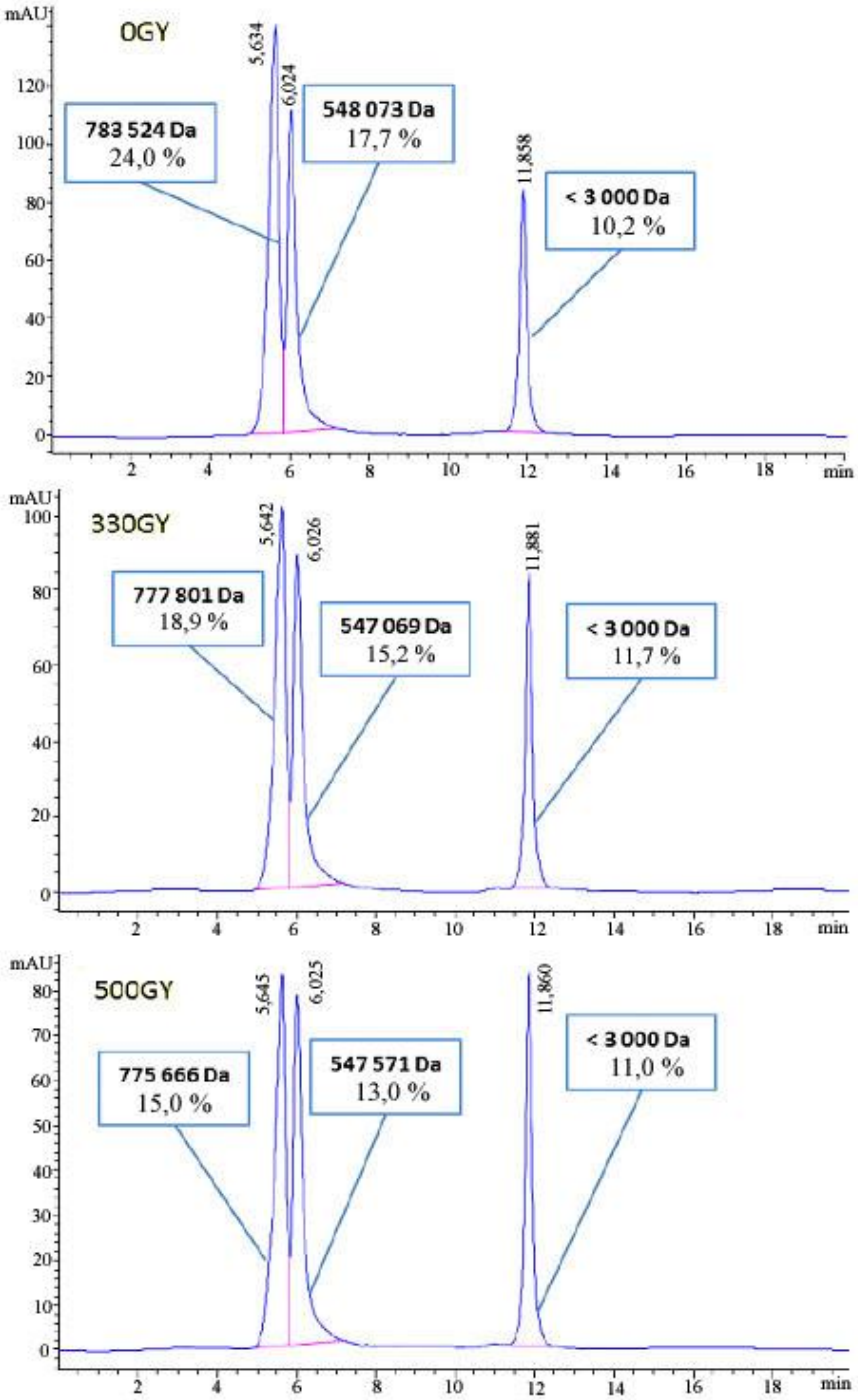


Obr. 3-29 Závislost ztrátového modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 30 °C [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

Naměřená data elastického modulu *G'* byla popsána dvojnásobným Maxwellovým modelem. Parametry modelu byly získány regresí pro různé hodnoty teploty a dávky ozáření. Výsledné hodnoty parametrů jsou uvedeny v tab. 3.15, společně s korelačními koeficienty. Ze získaných hodnot korelačních koeficientů je vidět, že jsou daleko větší, než je kritická hodnota pro 24 stupňů volnosti $r_{crit} = 0{,}389$ a pro hladinu významnosti $\alpha = 0{,}05$.

Na základě údajů z tab 3.14 lze konstatovat, že vyšetřovaný materiál – kolagenní hmota, může být popsán zvoleným modelem lineární viskoelasticity. Parametry Maxwellova modelu dle rovnice (3.84) a (3.85) byly korelovány ve vztahu k teplotě a dávce ozáření. Výsledky této analýzy jsou uvedeny společně s hodnotami parametrů a korelačními koeficienty v tab. 3.16.

Všechny parametry Maxwellova modelu jsou statisticky závislé jak na teplotě, tak na velikosti dávky ozáření, až na parametr μ_1. Korelační koeficienty obou lineárních regresí jsou větší než je kritická hodnota $r_{crit,12} = 0{,}532$ pro hladinu významnosti $\alpha = 0{,}05$. Z toho vyplývá, že teplota i dávka ozáření významně ovlivňují viskoelastické vlastnosti kolagenní hmoty.



Obr. 3-30 Procentuální podíl frakcí velikostí molekul kolagenu pro různé dávky ozáření, indikované chromatografem, na ose *x* je čas [min], na ose *y* je intenzita absorbance [mAU] [Landfeld, Skočilas, et al 2016]

Při měření elektrické vodivosti nebyl zjištěn významný vliv deformace ani velikosti dávky ozáření. Hodnota měrné elektrické vodivosti v rámci použité metody, operačních parametrů a rozsahu hodnot měnících se parametrů vykazovala jen minimální odchylky od hodnoty 0,245 $S.m^{-1}$. Je tedy patrné, že měrná elektrická vodivost nezávisí na velikosti deformace ani velikosti dávky ozáření ve zkoušených intervalech.

Navrženou metodu a přístroje nelze použít pro nepřímé měření reologických parametrů kolagenní hmoty, měřením elektrické vodivosti, rozhodně ne ve zde uváděných intervalech smykových deformací.

Podíl jednotlivých frakcí velikostí molekul kolagenu byl zjišťován pro dvě dávky ozáření a neozářený vzorek. Výsledky chromatografie jsou uvedeny na obr. 3-30.

Procenta jednotlivých frakcí byla stanovena jako miligramy frakce na 100 miligramů vysušeného kolagenu. Byly použity vzorky ozářené dávkami 330 a 500 Gy. Z grafů je vidět, že ozáření nemá prakticky žádný vliv na rozložení molekulární hmoty (na distribuci hmotnostních frakcí). Na druhou stranu ozáření ovlivnilo celkové množství vymytého (eluovaného) kolagenu, pro neozářený vzorek 52 %, pro dávku 330 Gy je to 46 % a pro dávku 500 Gy jen 39 %. Množství makromolekul v nejtěžší skupině (780 kDa a 547 kDa) klesá s rostoucí dávkou radiace.

Shrnutí

Ačkoliv existuje celá řada studií týkajících se reologických vlastností kolagenu, v drtivé většině případů se zkoumanou látkou stává řídký roztok obsahem kolagenu do 2 %. V tom případě se stává lépe uchopitelným z hlediska standardních metod reometrie, neboť se chová více jako kapalina, kterou lze měřit na rotačních a kapilárních reometrech.

Existuje jen velice málo prací, resp. autorů, kteří se pustili do studia právě takto vysocekoncentrovaných kolagenních hmot (od 6 % více), které se chovají jako pasta, nebo těsto, tedy viskoelastické pevné těleso. A přitom právě tyto látky se zpracovávají v potravinářském průmyslu ve velkých objemech. Z čehož vyplývá, že pro návrh strojů a zařízení technologie zpracování takovýchto látek je nezbytná znalost tokového chování.

Ze zmíněných vlastních prací autora vyplývá snaha o pochopení a popis koncentrované kolagenní hmoty jako fenoménu, který je složité jednoduše definovat základními inženýrskými přístupy. V rámci dlouholetého a intenzivního výzkumu chování kolagenní hmoty bylo nelezeno spoustu zajímavých poznatků, které posouvají některá technická odvětví o kousek dopředu.

Jedním z příkladů může být nalezená jednoduchá inženýrská rovnice (3.17) pro stanovení třecích ztrát laminárního toku mocninové kapaliny v potrubí o nekruhovém průřezu odvozená a verifikovaná autorem práce.

Do současné doby se třecí ztráty počítaly nejčastěji na základě tabelovaných empirických konstant vycházejících z mnoha experimentálních dat pro každý tvar průřezu zvláště. Autor této práce však navrhl novou rovnici, která používá nově stanovenou jednoduchou závislost mezi indexem toku a konstantou definovanou pro tok newtonské kapaliny. Odchylka výsledků rovnice od původního výpočtu je menší než 4 % v celém rozsahu indexu toku pro pseudoplastické kapaliny, což je přijatelné z hlediska inženýrského návrhu např. čerpadla. Novou rovnici lze jednoduše algoritmizovat.

Dále lze uvést návrh a realizaci měřicí aparatury pro stanovení reologických vlastností kolagenní hmoty. Návrh instrumentace a metodiky měření, včetně algoritmu zpracování naměřených dat navrženým modelem. Identifikace parametrů modelu regresní analýzou a systematické měření včetně statistického zpracování.

Výsledkem jsou parametry toku kolagenní hmoty (o různé vstupní „kvalitě“) pro modely typu mocninová kapalina, index toku (0,25 - 0,28), koeficient konzistence (490 – 2800 $Pa.s^n$) a jeho závislosti na obsahu sušiny kolagenu, parametrů modelu Herschel – Bulkley, index toku (0,29 – 0,39), koeficient konzistence (473 – 960 $Pa.s^n$) a meze toku (938 – 4000 Pa). Pro popis nejen

čistě smykových vlastností, ale i pro viskoelastické vlastnosti byly aplikovány modely, které ukázaly jejich účinnost při použití z hlediska přesnosti a jednoduchosti.

Byly hledány a použity alternativní přístupy k měření viskoelastických veličin, pokud navrhované původní metody selhávaly pro tok kolagenní hmoty. Například standardní metoda měření radiálního vytěsňovacího toku (squeezing flow) byla na základě hypotézy o vzájemném vztahu mezi reologickými a elektrickými vlastnostmi upravena, jak z hlediska rekonstrukce standardní měřicí aparatury, tak metodiky vyhodnocení naměřených dat. Je třeba přiznat, že se tato pracovní hypotéza nepotvrdila, nicméně v případě tepelných a elektrických vlastností se tuto závislost podařilo najít.

Při studiu tepelných a elektrických vlastností opět na vlastní postavené aparatuře autor získal závislosti měrné tepelné kapacity a měrné elektrické vodivosti na teplotě kolagenní hmoty a zároveň bylo zjištěno, že průběh elektrické vodivosti indikuje oblast denaturace kolagenu stejně jako křivka tepelné kapacity.

V neposlední řadě byla věnována i velká pozornost možnostem modifikace vlastností kolagenní hmoty především působením elektromagnetického záření. Vzorky hmoty byly ozařovány malou dávkou elektromagnetického záření a sledován jeho vliv na mechanické vlastnosti a strukturu. Z tohoto výzkumu plyne slibný potenciál aplikace ozařování do průmyslové výroby, samozřejmě za předpokladu, že takto vyrobený produkt si zákazník koupí, obzvláště pokud se jedná o potravinářských produkt, což je významným rizikem použitelnosti této metody.

I přes veškerou snahu o detailnější popis a pochopení chování vysoce koncentrované kolagenní hmoty ve formě pasty nebo těsta, úspěšně i neúspěšně ukončený výzkum neustále generuje nové otázky, problémy a limity, které je nutno zodpovídat, řešit a překonávat. Ačkoliv je prezentován vcelku komplexní přístup k dané problematice, stále se objevují bílá místa na poli poznání a potenciálně slibné technologie využitelné v průmyslu. Uvedené výsledky, které již byly využity jak v dalším výzkumu, tak v praxi, představují jen zlomek mozaiky, kterou je nutné poskládat k dokreslení celého obrazu.

4. NÁVRH ZAŘÍZENÍ A ANALÝZA ŘEŠENÍ

Při návrhu zařízení je nejprve nutno definovat obecné podmínky, podle nichž budu dále postupovat v jednotlivých krocích.

Inženýrský návrh zařízení je postup vyžadující jasně definované zadání, pokud má být efektivní z hlediska času a vynaložených prostředků. Zadání by mělo obsahovat specifikaci suroviny, finální produkt a technologii, včetně omezujících podmínek provozních a procesních parametrů zařízení a z pohledu investora nejdůležitější parametr a tím je produkce stroje.

Obecný návrh zařízení lze definovat takto

1) Popis technologie a identifikace procesu zpracování produktu včetně způsobu měření požadovaných parametrů výrobku.
2) Provedení detailní literární a patentové rešerše vlastností suroviny, technologie a konstrukčního řešení zařízení.
3) Popis mechanismů procesů uvnitř zařízení.
4) Návrh zařízení (laboratorní nebo poloprovozní měřítko) a volba materiálu.
5) Výroba zařízení, provedení zkušebních experimentů nebo simulací modelu, a ověření funkce zařízení.
6) Návrh metodiky zvětšovaní měřítka zařízení.
7) Zobecnění postupu návrhu zařízení.

Před vlastním návrhem je potřeba se seznámit s neopomenutelnými faktory, které ovlivňují návrh zařízení pracující především v potravinářském průmyslu.

Zpracování zemědělských produktů, polotovarů a surovin vytváří nemalé a různorodé požadavky na stroje a zařízení pro potravinářský průmysl, právě rozsáhlou škálou vlastností dílčích surovin ale i požadavků na specifické vlastnosti výrobků. Pokud přírodní zdroje potravin nejsou schopny vyhovět požadavkům trhu (tj. zákazníka), je nutné pracovat i s produkty chemické a biochemické výroby, které ačkoliv jsou společností zatracovány, přináší do potravinářské výroby jistou míru stability a bezpečnosti.

Neodmyslitelnou součástí každé výroby nejen v potravinářském provozu jsou procesy spojené s dopravou suroviny od skladovacího zařízení ke zpracovatelskému stroji. Kapaliny jsou dopravovány různými typy potrubních sítí a kanálů, v případě těst a gelů i dopravníků. Dle charakteru látky se volí vhodný typ dopravního stroje – převážně čerpadla, pro jehož návrh je nutno znát jak tokové vlastnosti materiálu, tak topologii sítě, včetně všech jejích částí. Výsledkem výpočtu je pracovní bod systému potrubní sít-čerpadlo.

Další fází výroby je zpracování dopravené látky ve specifickém stroji. Pro vybrané typy látek to jsou různé typy homogenizátorů (míchací zařízení, hnětače), které zajišťují rovnoměrné rozložení koncentrací jednotlivých složek, stavových veličin (hlavně teploty) nebo vlastností v pracovním prostoru zařízení (pH, barva, chuť, aroma, struktura, atp.), případně zajišťuje intenzifikaci přenosu tepla (chlazení i ohřev) a hmoty.

Často se u těchto látek také vyskytuje konečná úprava tvaru výrobku a to pomocí procesu extruze. Materiál je protlačován kalibrační hlavou (nebo sítem), ve které je vytvořen negativ tvaru průřezu výsledného profilu výrobku (těstoviny, keksy, těsto na pečivo, atd.), nebo je vtlačován do obalu (uzeniny, masné výrobky, pasty, atd.).

Vysokoviskózní látky jsou charakterizovány zdánlivou viskozitou větší než 10 Pa.s. Při jejich zpracování lze jen těžko dosáhnout turbulentního režimu proudění a vnitřní viskózní tření u

nich způsobuje obtížně kontrolovatelné ohřátí. Většina těchto látek vykazuje nenewtonské chování, především pseudoplastické, často s mezí toku [Macosko, 1994].

4.1 SPECIFIKA POTRAVINÁŘSKÉHO PRŮMYSLU

Potravinářský průmysl klade vysoké nároky na hygienu provozu a s tím souvisí i tzv. hygienický design zařízení a strojů. Hlavní zásadou je snadná čistitelnost, s minimem mrtvých či stagnačních oblastí, tedy požadavek na pozvolné přechody a souvislá napojení jednotlivých částí linky, eliminace kontaminace produktu spojená hlavně s problematikou utěsňování pevných a pohyblivých spojů a v neposlední řadě také snadná rozebíratelnost [EHEDG]. Samozřejmostí jsou i požadavky na materiál, který je v kontaktu s potravinou. Tyto požadavky upravuje legislativa.

Z hlediska konstrukčního uspořádání a provozu (výroba, údržba, čištění) musí zařízení splňovat požadavky nařízení ES/2004/852. Přímo konstrukci a materiálům, které přicházejí do styku s potravinou, se věnují směrnice ES/2006/42 (ISO 14159), ES/2004/1935 a ES/2006/2023 s nimiž byly harmonizovány naše státní normy, které jsou pro výrobce zařízení závazné. Nejvýznamnější z pohledu návrhu zařízení a jeho provozu je norma ČSN EN 1672-2+A1, která zároveň slouží jako kritérium prohlášení o shodě pro vybraná potravinářská zařízení a výrobní linky [Chadima, 2018]. Vedle toho samozřejmě existují zákony týkající se potravin, chovu zvířat, ochrany zdraví a spotřebitele.

V rámci České republiky existují zákonem ustavené kontrolní mechanismy a orgány, jejichž kontrolám potravinářská výroba podléhá. Státní zemědělská a potravinářská inspekce se zaměřuje na výrobu, uskladnění (uchovávání), přepravu a prodej potravin. Státní veterinární správa má v kompetenci, která vychází z legislativy ČR a EU, kontrolu výroby a s tím souvisejících procesů živočišné výroby. Obě státní správy podléhají ministerstvu zemědělství.

Dalšími orgány, jejichž kontroly jsou nepřímo zaměřeny na vliv strojního vybavení na kvalitu potravina a na zdraví obyvatelstva, jsou Hygienická služba (Hygienické stanice) – ministerstvo zdravotnictví, Česká obchodní inspekce – ministerstvo průmyslu a obchodu, a Inspekce životního prostředí – ministerstvo životního prostředí.

V Evropské unii působí obdobné instituce - Generální ředitelství Evropské komise pro zdraví a bezpečnost potravin (DG Health and Food Safety – DG SANTE), Německo – Spolkový úřad pro hodnocení rizik (The German Federal Institute for Risk Assessment -BfR), Francie – Francouzský úřad pro potraviny, životní prostředí, ochranu zdraví při práci a bezpečnost (The French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety – ANSES), Velká Británie – Úřad pro potraviny Spojeného království (Food Standards Agency – FSA), které svou legislativou upravují například, který materiál lze použít pro styk s potravinou [MZe – informační centrum bezpečnosti potravin]. V případě USA je to Úřad pro kontrolu potravin a léčiv (U. S. Food and Drug administration – FDA).

Pro strojní inženýry jsou při základním návrhu stroje důležité především předpisy týkající se hygienického návrhu a provozu zařízení a povolených konstrukčních a technologických materiálů.

Používané materiály lze členit na kovové (oceli a ostatní neželezné kovy) a nekovové (polymery a skla). Mezi základní materiály v potravinářském průmyslu patří slangově označována „potravinářská“ ocel třídy DIN 1.4301, resp. AISI 304. Tato ocel splňuje standardní požadavky výroby, jako je korozivzdornost, dobrá svařitelnost, tepelná stabilita (do 350 °C), atd. Základní přehled dalších ocelí uvádí tab. 4.1.

Tab. 4.1 Přehled nejčastěji používaných ocelí pro potravinářský průmysl [Armat]

Označení	**Složení**	**Vlastnosti**	**Použití**
DIN 1.4301 AISI 304 ČSN 17618 EN X5CrNi 18-10	C ≤ 0.07 % Cr 17-19 % Ni 8-10.5 %	Odolnost proti korozi Dobrá svařitelnost Dobrá tažnost za studena Obtížná obrobitelnost	Pivovary, tukový průmysl, jatka, potrubí
DIN 1.4307 AISI 304L ČSN 17249 EN X2CrNi 18-9	C ≤ 0.03 % Cr 17.5-19.5 % Ni 8-10 %	Odolnost proti korozi Odolnost vůči kyselinám Dobrá svařitelnost Dobrá tažnost Tepelná stabilita Dobrá obrobitelnost	Tlakové nádoby, zásobníky
DIN 1.4541 AISI 321 ČSN 17248 EN X6CrNiTi 18-10	C ≤ 0.08 % Cr 17-19 % Ni 9-12 % Ti ≤ 0.7 %	Odolnost proti korozi Odolnost vůči kyselinám Odolnost vůči chloridům Dobrá svařitelnost Dobrá obrobitelnost	Nádrže, potrubí, pivovary, mlékárny

Z neželezných kovů se můžeme v potravinářském průmyslu setkat s použitím titanu, tantalu, hliníku a cínu v potravinářském průmyslu. Hliník se používá převážně v obalovém průmyslu (komerční název alobal) při výrobě fólií, cín pro jeho špatné mechanické vlastnosti se nepoužívá samostatně, ale je vhodný pro pokovování (konzervy) a titan se používá pro svou výbornou chemickou odolnost a mechanické vlastnosti pro speciální použití (kryogenní nádoby).

Tab. 4.2 Slitiny niklu nejběžněji zastoupené v potravinářském průmyslu [Continental, Special metals, Armat]

Označení	**Složení**	**Vlastnosti**	**Použití**
Inconel 600	C ≤ 0.10 % Cr 14-17 % Ni ≥ 72 % Fe 6-10 % Ti ≤ 0.5 %	Odolnost proti korozi Tepelná stálost Nemagnetická Dobrá svařitelnost Vysoká pevnost	Pro kryogenní i vysoké teploty, Nádoby na zeleninu a mastné kyseliny
Monel 400	C ≤ 0.30 % Mn ≤ 2 % Cr 28-34 % Ni ≥ 63 % Fe ≤ 2.5 %	Vysoká odolnost proti korozi a agresivnímu prostředí (kyseliny a zásady) Vysoká pevnost Dobrá svařitelnost Dobrá tažnost	Vysokoteplotní aplikace, výměníky tepla
Hastelloy C-22	C 0.015 % Cr 20-22.5 % Ni 53-63 % Mo 12.5-14.5 % W 2.5-3.5 %	Vysoká odolnost proti korozi a agresivnímu prostředí (kyseliny a zásady) Vysoce tažná Zaručená svařitelnost Dobrá obrobitelnost	Tělesa čerpadel, těla a funkční části měřidel

Samotná měď se v potravinářském průmyslu používá spíše z estetických důvodů. Ačkoliv má velmi dobré inhibiční vlastnosti na růst mikroorganismů, povrch mědi špatně odolává silným kyselinám a oxidy mědi se rozpouštějí do potraviny. Z hlediska průmyslového využití tedy měď nevyhovuje požadavkům na množství uvolňovaných látek z povrchu stroje do potraviny (průmyslové sanitace - silné kyseliny a zásady).

Drahé kovy jako stříbro a zlato jsou, vzhledem k jejich ceně, využívány výjimečně pro speciální či estetické účely.

V daleko širší míře se používají slitiny neželezných kovů, včetně výše zmiňovaných, ať již přímo pro nosnou konstrukci, nebo také ve formě ochranného povlaku (TiN). Monely (slitiny niklu a mědi 27-34 %), Inconely (slitiny niklu a chromu) a Hastelloy (slitina niklu, chromu a molybdenu) jsou představitelé materiálů splňující vysoké nároky na odolnost vůči korozi a agresivnímu prostředí a zároveň na mechanické vlastnosti. Shrnutí nejčastěji se vyskytujících slitin toho typu v potravinářském průmyslu je uvedeno v tab. 4.2.

Tab. 4.3 Polymery v potravinářském průmyslu [Dobiáš, 2004; Běhálek, 2016]

Označení	**Název**	**Vlastnosti**	**Použití**
PET	polyethylentereftalát	Nízká navlhavost a nasákavost. Nízká odolnost vůči chemikáliím (silné kyseliny a zásady) rozměrová stálost, otěruvzdornost	Obaly na nápoje, vlákna
HDPE	vysokohustotní polyethylen	Odolný vůči zásadám i kyselinám, opotřebení, dobře obrobitelný	Kelímky, krabičky
LDPE	nízkohustotní polyethylen	Odolný vůči zásadám i kyselinám, opotřebení	Smrštitelné obaly, fólie, víčka
PP	polypropylen	Odolný vůči UV, alkoholům, organickým rozpouštědlům, nízká hustota, vysoká pevnost	Nádoby a potrubí, nádobí pro mikrovlnnou troubu, těsnění
PS	polystyren	Odolný vůči vlhkosti, dobré izolační a dielektrické vlastnosti, odolný vůči alkoholům, minerálním olejů, a zásadám	Plastové příbory, kelímky, krabičky
PTFE	polytetrafluorethylen	Chemická odolnost, odolný vůči UV, výborné kluzné vlastnosti, samozhášivost, nenasákavý	Povlaky, maziva

V neposlední řadě je třeba zmínit nekovové materiály, hojně užívané v potravinářském průmyslu. Nejčastěji se setkáváme s použitím polymerů a skleněných materiálů a to především v obalovém průmyslu, viz tab. 4.3. Také některé funkční a pohyblivé části strojů, například čerpadel, dopravníků, hnětačů, atp. jsou vyrobeny z polymerů nebo jsou kovové části obaleny vrstvou polymeru (metly hnětače). Pro speciální účely lze použít i dřevo (sudy – alkohol, sýry, zátky) [Smejtková, 2004].

Povrchové úpravy se pro části, které jsou ve styku s potravinou, příliš často nepoužívají. Při mechanickém poškození totiž hrozí odloupnutí a kontaminace potraviny. Pro speciální účely (nízké pH) nebo běžné domácí použití (smalt – kuchyňské nádobí) jsou však povrchové úpravy používány. Důležitou vlastností povrchu, především z hlediska sanitace, je drsnost. Povrchy, které přichází do styku s potravinou, jsou leštěny (Ra 0,2 – 0,4) nebo broušeny (Ra 0,4 – 0,8) proto, aby nedocházelo k ulpívání nečistot na stěnách zařízení. Nicméně u povrchů, kde dochází k přestupu tepla, se drsnost předepisuje k horní hranici uvedeného intervalu. V závislosti na způsobu provozu a požadavcích na čištění se po ukončení výrobního cyklu plánuje mechanické čištění (ruční s použitím kartáčů nebo tlakové vody). Typickým příkladem jsou zařízení zpracovávající cukr nebo cukerné roztoky.

Procesní inženýr v potravinářském průmyslu musí tedy dbát nejen předpisů základních technických norem, ale také příslušné legislativy. Je omezen těmito předpisy a vlastnostmi zpracovávaného materiálu na úzký rozsah použitelných konstrukčních materiálů, které například kladou další nároky na způsoby výroby zařízení. Tyto podmínky se samozřejmě dotýkají také technologie zpracování vysokoviskózních látek.

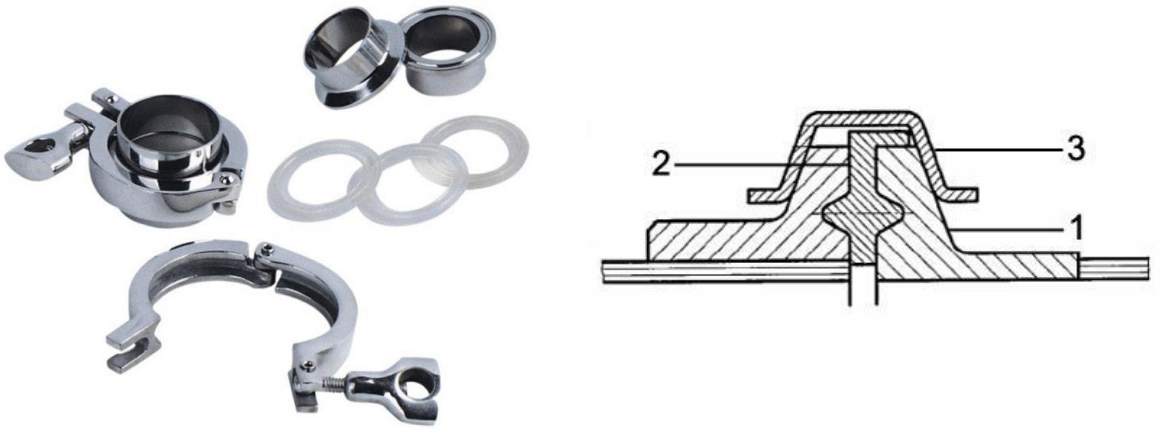
4.1.1 Dopravní stroje a zařízení

Tokové vlastnosti vysokoviskózních látek, které vykazují „jen“ vysokou viskozitu (např. med), nebo pseudoplastické či dilatantní chování, významně ovlivňují způsob jejich dopravy. Tyto látky kladou vysoký odpor proti tečení a ten je nutno strojem překonat. Odpor látky je často doprovázen disipací mechanické energie v teplo. Ačkoliv se v drtivé většině případů dopravy těchto kapalin jedná o plouživý režim proudění (vzhledem k jejich vysoké dynamické či zdánlivé viskozitě), čerpání takovýchto látek je často velice energeticky náročné a klade vysoké a nákladné požadavky na řízení a provoz čerpadel, stejně jako ostatních zpracovatelských strojů. Pokud kapalina vykazuje vysokou mez toku, je nutno tuto mez při rozběhu čerpadla překonat, což je složité z hlediska rozběhu stroje (dnes se používá frekvenční měnič, v extrémních případech také samostatné rozběhové čerpadlo nebo speciální převodovka). Vedle přesunu materiálu z místa na místo, klade potravinářský průmysl další požadavky na provoz čerpadla. Čerpané látky mohou být heterogenní směsi, které obsahují výrobně požadovanou strukturu (vlákna, jehlice, sférické částice, soudržnost dvou látek – maso a tuk, celistvé částice – ovoce v kompotech, žloutky), jejímž poškozením nebo separací by mohlo dojít ke znehodnocení výrobku. Proto je nutno brát v potaz i tyto aspekty ovlivňující princip a konstrukční uspořádání čerpadla. Pro návrh vhodného čerpadla, kromě výše uvedených požadavků, je hlavním kritériem průtok a tlaková ztráta (potřebná výtlačná výška) systému.

Potravinářské látky mají často velice komplikované tokové chování, viz reologie kolagenu. Výpočet tlakové ztráty potrubí pro požadovaný průtok nenewtonské kapaliny se následně redukuje na inženýrské výpočty uvedené v základní literatuře zabývající se přenosem hybnosti kapaliny [Chhabra, 1999]. Přechodové stavy, typu rozběh a zastavení čerpadla, se řeší například frekvenčním měničem, přídavným čerpadlem nebo obtokovou smyčkou. Reologii vysokoviskózních látek byly v této práci věnovány samostatné kapitoly.

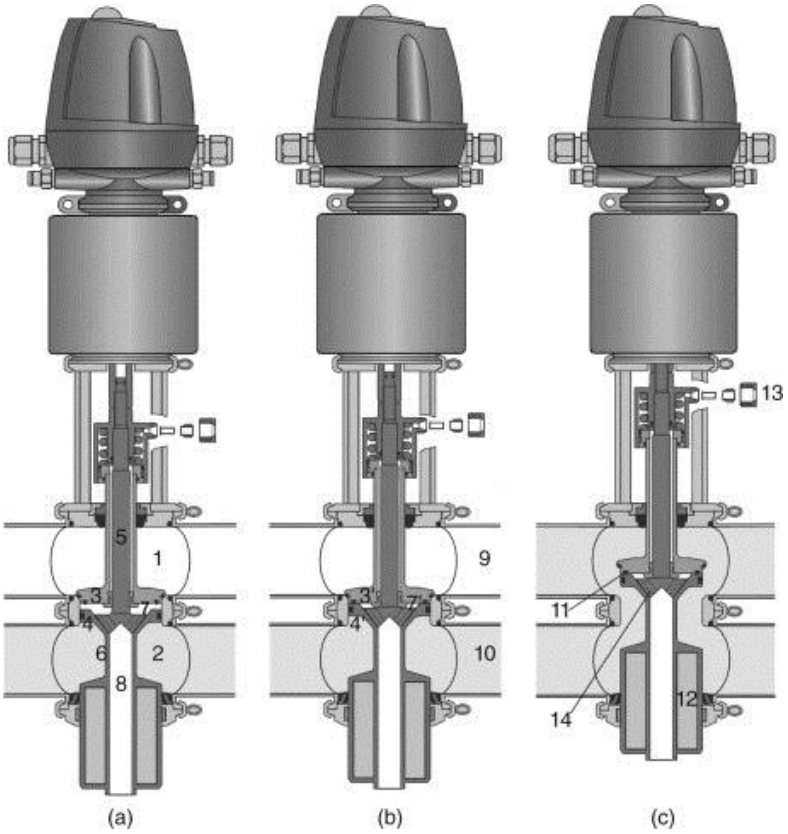
Potrubí

Mohlo by se zdát, že lze pro dopravu potravin použít standardní potrubí a armatury pro dopravu potravin, jen s ohledem na schválené materiály. Často se zapomíná, že po skončení výroby následuje technologický proces, který standardně vyžaduje až 1/3 provozní doby zařízení a podléhá také předpisům a nařízením pro potravinářský průmysl. Jedná se o proces sanitace, na základě jehož požadavků vznikla celá řada dnes běžně používaných konstrukčních úprav zařízení. Například přírubové spoje potrubních systémů jsou řešeny speciální spojkou **Clamp**, která umožňuje rychlé rozebrání a snadné čistění potrubních úseků, viz obr. 4-1.



Obr. 4-1 Spojka typu Clamp ISO 2852 [Sanitary Stainless Steel Tri Clamp Fittings], 1 – navařovací příruba, 2 – těsnění, 3 – třmen.

Dalším příkladem může být uzavírací prvek optimalizovaný pro řízení více toků v jednom tělese. Jedná se o **dvousedlový a více sedlový ventil**, který se instaluje do místa pomyslného křížení porubí, tedy dvou a více potrubních tratí, které jsou uspořádány nad sebou a spojeny tělem ventilu. Uzavírací člen ventilu potom dokáže řídit toky v jednotlivých potrubních větvích najednou. Tím se sníží počet uzavíracích prvků, sníží se velikost prostorové zástavby potrubní sítě, ale zvýší se složitost její topologie.



Obr. 4-2 Sedlový ventil používaný v potravinářském průmyslu, tzv. mixing proof valve [Lelieveld, 2014].

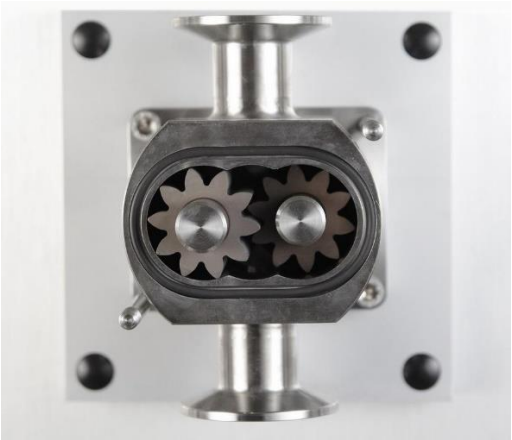
Z hlediska bezpečnosti musí takovýto ventil zabránit promíchání dvou kapalin z různých zdrojů, typicky nejhorší variantou je případné míchání produktu a sanitačního prostředku. Takový ventil je vybaven speciální konstrukcí (mixing proof valve), která zamezuje při

poškození těsnění mezi sedlem a kuželkou promíchání těchto proudů, viz obr. 4-2. Vnitřní prostor ventilu je spojen s okolním prostředím a v případě poškození těsnění průsak vytéká nikoliv do druhé látky, ale mimo ventil. Látka zpravidla vytéká na podlahu pod ventilem, vytváří kaluž a pro obsluhu linky indikuje problém chodu (podlahy v potravinářské výrobě musí být udržovány bez pevných a kapalných nečistot a jejich čištění je součástí každodenního plánu sanitace).

Následující obr. 4-2 znázorňuje funkci provozu a konstrukci bezpečnostního vícecestného ventilu v potravinářském průmyslu. Ventil se skládá ze dvou kuželek a jednoho sedla. Každá z kuželek má vlastní ovládací táhlo, které ji otevírá a zavírá. Mezi kuželkami je odtokový prostor, který je spojený s vnějším prostředím mimo potrubí. Pokud bude některé z těsnění kuželek poškozené, kapaliny uniknou nejprve do tohoto prostoru a z něj mimo tělo ventilu. Obsluha tak pozná, že je s ventilem něco v nepořádku. Zároveň funkce ventilu umožňuje nadzdvihnutí horní kuželky spodní kuželkou a propojení obou potrubních větví stejnou kapalinou. Toho se využívá především při čištění výrobních jednotek a periferií. Samotný prostor mezi kuželkami se také pokaždé čistí v rámci sanitace zařízení, k eliminaci růstu případných nežádoucích mikroorganismů.

Čerpadla

Pro čerpání kapalin se používají hydrostatická a hydrodynamická čerpadla. V drtivé většině případů se používají k dopravě vysokoviskózních látek používají hydrostatická čerpadla, vzhledem k jejich příznivé hydraulické charakteristice. Nejčastěji se pro čerpání těchto kapalin v potravinářském průmyslu setkáváme s čerpadly zubovými, vřetenovými, s rotujícími písty a membránovými, případně pístovými čerpadly. Vyplývá to z nároků na jednoduchou konstrukci minimálně v čerpacím prostoru, a s tím spojenou snadnou čistitelnost, dostatečnou těsnost, šetrnost vůči některým čerpaným materiálům a vysoký výtlak.

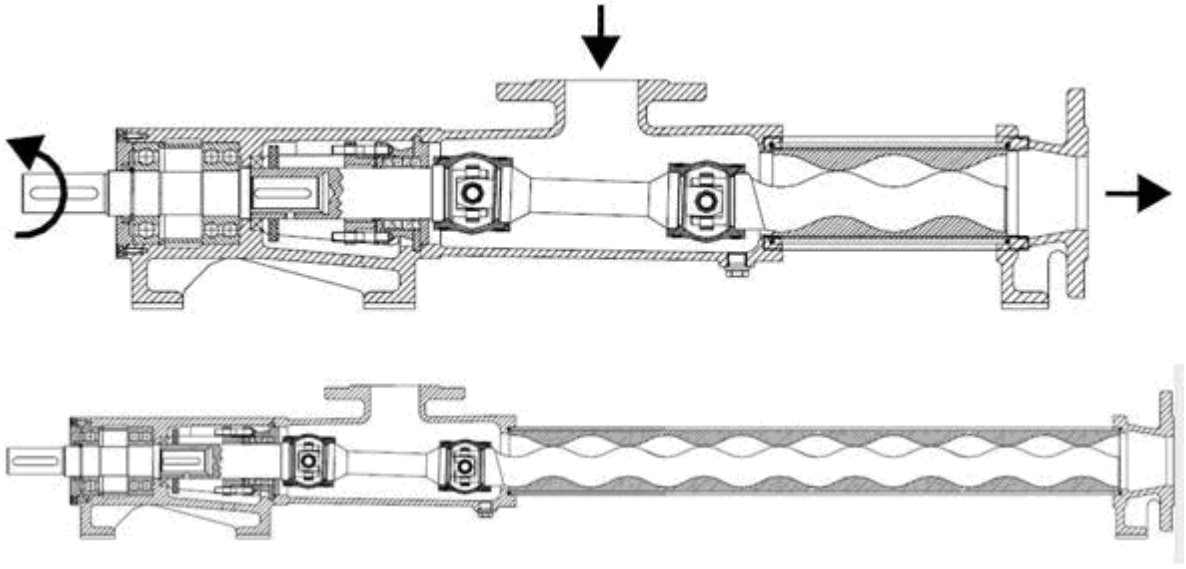


Obr. 4-3 Zubové čerpadlo pro čerpání pastovitých látek [Albertina]

Zubová čerpadla jsou asi nejstarším typem hydrostatických čerpadel. Většinou jsou výrobně jednoduchá, mají malý škodlivý prostor a dobrou samonasávací schopnost, ale mají nižší účinnost v porovnání s ostatními hydrostatickými čerpadly, z důvodu netěsností mezi čelem ozubeného kola a skříní čerpadla [Melichar, 2002]. Zubová čerpadla dokážou udržovat velmi přesně konstantní hodnotu požadovaného objemového průtoku, bez výrazných pulzací, což se využívá např. u plniček. Naopak nejsou vhodná pro překonávání velkých hodnot hydraulických odporů. Příkladem může být použité zubové čerpadlo v automatickém lineárním plnicím stroji Apollo GR české firmy Albertina, viz obr. 4-3. Plnička je vhodná pro plnění pastovitých látek. Příkladem takových látek mohou být masti, šampóny, gely, majonézy, kečup nebo omáčky

[Albertina]. Na obr. 4-3 je také možno si všimnout připojovacích navařovacích přírub typu Clamp. Těsnění hřídelů je řešeno mechanickou ucpávkou, chlazenou vodou. Standardně jsou tato čerpadla konstruována se dvěma zubovými koly, ale můžeme se setkat i se třemi a více koly.

Vřetenová čerpadla jsou standardně používána ve vodním hospodářství (ČOV) pro čerpání kalů a znečištěných vod, nicméně pro speciální aplikace, jako jsou vysokoviskózní látky, pasty, oleje, tuky, atp. se používají také v potravinářství. S výhodou se používají pro látky citlivé na smykové tření a tam, kde vzniká nebezpečí tvorby pěny (pokud je nežádoucí). V praxi se můžeme setkat s vertikálním (vodním hospodářství) i horizontálním (potravinářství) uspořádáním, s jedno, dvou a třívřetenovou konstrukcí. Látka je dopravována rotačním pohybem hřídele – vřetena v axiálním směru od sacího otvoru k výtlačnému. Rotor i stator jsou opatřeny speciálně tvarovaným závitem (Archimédův, oblý, obdélníkový, lichoběžníkový, cykloidální a další), který eliminuje mrtvé zóny. Chod čerpadla je klidný, tichý a bez pulzací, čerpadlo má vysokou mechanickou odolnost a životnost, ale nižší účinnost v porovnání s ostatními čerpadly. Pro pracovní prostor se používá nejen nerezová ocel, ale i polymery jako například PTFE nebo pryž. Uložení hřídele je standardně vetknuté, tak jako u většiny podobných zařízení. Těsnění hřídele je opět řešeno mechanickou ucpávkou [Melichar, 2002]. Vzhledem k velkým rozměrům se hůře začleňuje do výrobní linky. Termolabilní kapaliny jsou dochlazovány před a za čerpadlem, neboť při plouživém toku (vysoká viskozita), nízké době zdržení (vysoké průtoky), nízké tepelné vodivosti jak nerezové oceli či polymeru, tak kapaliny a rozměrům pláště, je chlazení statorem čerpadla, resp. duplikátorovým pláštěm, neefektivní [Vojáček, 2011].



Obr. 4-4 Vřetenové čerpadlo [Vojáček, 2011]

Čerpadla typu Lobe s rotujícími tvarovými písty jsou nejčastěji využívanými dopravními aparáty produktů v potravinářském průmyslu pro kapaliny s velkým rozsahem viskozity a také pro směsi kapalin a pevných látek ve formě velkých částic (kusy ovoce, čokolády, celé syrové žloutky, atp.). Pracují na podobném principu jako zubová čerpadla. Jsou opatřena dvěma identickými, ale protiběžnými rotory, na kterých je upevněno kolo se speciálním profilem ve tvaru dvou či tří kulatých zubů. Na rozdíl od zubových čerpadel se však profily kol navzájem ani stěny nedotýkají. To má obrovskou výhodu vzhledem k menšímu opotřebení rotujících ploch a chodu na prázdno. Kromě kapalin lze čerpat tímto čerpadlem i plyny a sypké materiály. Výstupní tlak i průtok je bez pulzací. Tato konstrukce a princip čerpání formou dopravy produktu v relativně velkých kapsách bez ostrých hran umožňuje čerpat materiály typu

vysokoviskózních kapalin nebo past i s obsahem dlouhých vláken, které se průchodem čerpadla neporuší. Čištění tohoto čerpadla je velice snadné, stejně jako v případě zubových čerpadel, neboť čelo krytu rotujících částí je odnímatelné.

Obr. 4-5 Čerpadlo typu Lobe [Vojáček 2011, Nakakin NC]

Díky své konstrukci, čerpadlo Lobe umožňuje dopravovat kapaliny vysokým průtokem, avšak v oblasti nízkých tlaků (mezi rotory a stěnou jsou mezery, nedochází k odvalování ani tření mezi rotory a statorem). Mezi hlavní nevýhody čerpadla patří vysoká pořizovací cena způsobená požadavky na přesnou výrobu a řízení otáčení a synchronizaci rotorů [Vojáček, 2011].

Základním typem hydrostatického čerpadla je *pístové čerpadlo* [Melichar, 2002]. Principem dopravy kapaliny je pohyb pístu (pístů) ve válci (válcích), který kapalinu stlačí a „posune“ od nátokového ventilu k výtlačnému. Pracovní cyklus má nejčastěji dvě fáze – sací a výtlačnou. Jednotlivé části zařízení jak pohyblivé, tak stacionární, jsou relativně jednoduché a levné na výrobu. Nespornou výhodou těchto čerpadel je dosahování vysokých hodnot výstupních tlaků a nízkých hodnot tlaků sacích. Těmito zařízeními lze dopravovat vysokoviskózní látky (pasty, kaly, škrobový - bonbonářský sirup i s pevnými částicemi), které by jiný typ čerpadla jen těžko uvedl do pohybu. Správné konstrukční uspořádání těsnění pístu ve válci umožňuje i chod na prázdno bez poškození čerpadla. Oproti ostatním čerpadlům mají vyšší účinnost. Především malá pístová čerpadla se používají v dávkovacích strojích pro přesné dávkování produktu vzhledem k jejich jednoduché geometrii (válec) a řízení počtem zdvihů například klikového mechanismu. Jejich hlavní nevýhodnou je pulzační tok, způsobený právě mechanismem přenosu kinetické energie pístu na tlakovou. Významný rozdíl mezi výtlačným a sacím tlakem v jedné komoře vyžaduje instalaci ventilů, což naopak konstrukci a údržbu stroje komplikuje. Pulzační tok lze částečné eliminovat instalací rotačních pístových čerpadel, ale vzhledem k vysokému počtu pohyblivých částí a nesnadné instalaci těsnění, se v potravinářském průmyslu pro čerpání vysokoviskózních látek tato čerpadla příliš nepoužívají.

Membránová čerpadla vycházejí z podobného principu jako čerpadla pístová. V pracovní komoře však chybí pohyblivý člen, neboť samotné stěny komory jsou pohyblivé a k sání nebo výtlaku dochází změnou vnitřního objemu komory. Tento systém čerpání má výhodu především v absenci těsnění pohyblivých částí. Nicméně oproti klasickým pístovým čerpadlům dosahují nižších průtoků. Vhledem k nízkému riziku úniku čerpané látky se používají pro dopravu agresivních či velice cenných kapalin. Z hlediska snadného řízení se také používají jako dávkovací čerpadla a to i pro kapaliny obsahující pevné částice, neboť nehrozí poškození produktu pohybem membrány ani hnacího mechanismu, který je oddělen od pracovního

prostoru. Jejich nevýhodou je relativně drahá pohonná jednotka, která elektricky nebo mechanicky musí vytvářet přímočarý vratný pohyb s vysokou frekvencí. Membránová čerpadla se v potravinářském průmyslu používají k dopravě například tekuté čokolády, rostlinných olejů, vína, piva nebo sirupů.

4.1.2 Zpracovatelské stroje a zařízení

Další a často hlavní fází výrobního procesu produktu z vysokoviskózní látky v potravinářském průmyslu je zpracování suroviny do konečné nebo postupové formy produktu (poté se již vlivem chemického nebo tepelného zpracování mění skupenství produktu v tuhou nebo elastickou látku). Nejčastěji používanými hydromechanickými procesy zpracování těchto látek jsou zejména míchání, hnětení nebo extruze (případně vstřikování). Tyto procesy jsou často uskutečňovány zařízeními, která jsou buď samostatná, nebo zapojená do jedné výrobní linky. V případě osamocených zařízení převažuje v technologii spíše ruční výroba, především tam, kde by se nevyplatila doprava mezi jednotlivými zařízeními, ať už z důvodů malé nebo nespojité výroby, nebo například nákladným opakovaným čistěním.

Proces *míchání* slouží v popisovaném případě spíše k přípravě směsi jednotlivých surovin, nejčastěji mísitelných kapalin a pevných látek (ve formě prášků), ze které se tímto procesem stane vysokoviskózní látka. Používá se mechanické míchání pohyblivými elementy nebo statické směšovače [Paul, 2004]. Pneumatické míchání není pro tyto aplikace vhodné (snad jen při procesu smíchání sypkých materiálů před kontaktem s kapalinami). Cíle procesu míchání jsou v popsané soustavě látek především příprava a urychlení homogenizace látky s rovnoměrným rozložením koncentrací jednotlivých složek v celém objemu a intenzifikace přestupu tepla z nebo do vsázky podle potřeby ohřevu či chlazení. Dalším častým použitím procesu míchání je homogenizace aditiva do již připravené vysokoviskózní látky, ať už z důvodů zlepšení jejích zpracovatelských vlastností nebo například obarvení do požadovaného odstínu.

Zařízení, v nichž se uskutečňuje míchání, jsou často válcové nádoby s rovným, nebo klenutým dnem, opatřené vhodným míchadlem a mohou být uspořádána vertikálně i horizontálně. Pro tyto aplikace se nejčastěji používají míchadla pomaloběžná, typicky kotvová, šroubová, pásová, zřídka lopatková v etážovém uspořádání. Konstrukce a provoz těchto zařízení jsou charakteristické malou mezerou mezi míchadlem a stěnou aparátu, vysokou hodnotou specifického příkonu, nízkými otáčkami míchadla a speciálními tvary míchadel zaručujícími disperzi a eliminujícími lokální ohřátí a rotaci vsádky spolu s míchadlem, [Paul, 2004].

Proces *hnětení* je specifickým pomaloběžným druhem míchání, jehož cílem není primárně homogenizovat zpracovávanou látku, ale měnit její strukturu nebo chemické složení. Nejčastěji se proces hnětení používá k deformaci vsázky při plouživém toku a to smykem, natažením, nebo stlačením [Paul, 2004]. Pří hnětení jde tedy především o zapracování plynu (vtlačení vzduchu) do zpracovávané látky, která je v kontaktu s atmosférou obsahující pracovní plyn, nebo k vytlačení plynu ze zpracovávané látky, to se děje za přítomnosti vakua. Hlavním cílem hnětení je však mechanické působení na polymerní řetězce obsažené v látce, které jsou citlivé na smykové napětí. Vlivem mechanického působení dochází ke vzniku nových látek a vazeb, které mají pozitivní nebo kritický vliv na další zpracování suroviny, viz například hnětení a kynutí chlebového těsta [Sluková, 2014]. Proces hnětení je však časově závislý a je třeba dobu trvání výroby řídit, neboť při krátkém čase hnětení se nové struktury nestihnou vytvořit a naopak při dlouhém čase hnětení se tyto nově vzniklé struktury mohou rozpadnout. Čas zpracování závisí především na druhu látky.

Obr. 4-6 Horizontální lopatkový mísič Stuha Mixer Blender – vlevo [Max Mixer CO., lmt. 1], Hnětač se Z-míchadly – vpravo [Max Mixer CO., lmt. 2]

Hnětače a mixéry v potravinářském průmyslu jsou často jedno zařízení, v němž se mohou vyměňovat pracovní elementy. Při hnětení se používají specifická míchadla s různě profilovanou geometrií, nože, metly, ramena, která mají oblý tvar bez ostrých hran, aby nedocházelo k porušení materiálu střihem. Proces míchání plynule přechází v hnětení vlivem zvýšení odporu zpracovávané látky, vyvářením chemických a fyzikálních vazeb mezi složkami. Proto ani výrobci strojů často nerozlišují mezi označením míchač nebo hnětač. Na konstrukci tvaru lopatek je kladem požadavek na snadnou čistitelnost ale i vyjímatelnost míchadel z látky, nebo látky z nádoby (často realizováno ručně).

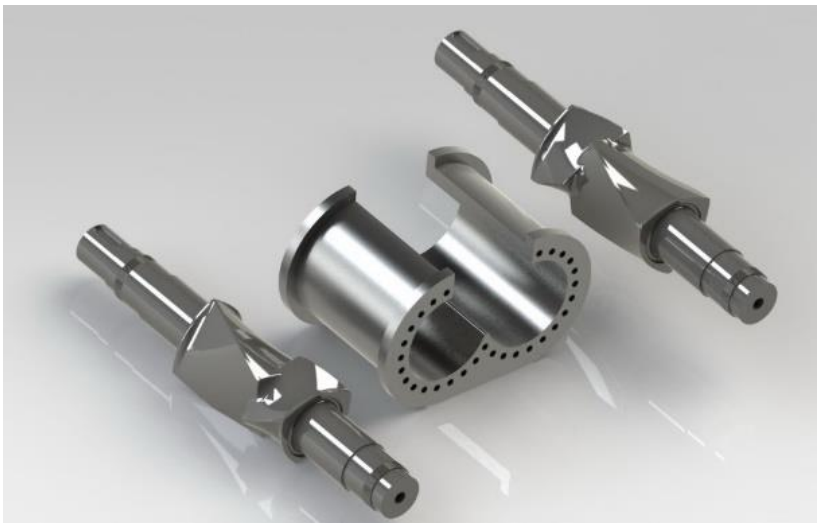
Výhodou horizontálních hnětačů a mísičů je možnost kontinuální výroby, kdy pracovní elementy jsou uchyceny na centrálním horizontálním hřídeli, a zpracovávaná látka postupuje ve směru osy tohoto hřídele. Pracovní elementy však neslouží k dopravě látky strojem, ale pouze k vykonání požadovaného technologického úkonu. Tyto stroje jsou zapojeny do linky vybavené výkonným čerpadlem, které překoná hydraulickou ztrátu zpracovatelského stroje. Nevýhodou horizontálních mísičů je nutnost použití vhodného těsnění mezi rotujícím hřídelem a skříní tak, aby nedošlo ke kontaminaci látky mazacími prostředky. V případě kontinuálního provozu je nutno chladit látku uvnitř mísiče, neboť dochází k disipaci mechanické energie do látky a tím významnému ohřátí. Kontinuální provoz není vhodný pro teplo citlivé látky, neboť k chlazení dochází pouze při kontaktu se stěnou (případně dutým chlazeným hřídelem), kde přestup tepla je nedostačující díky špatným tepelným vlastnostem zpracovávané látky.

Vzhledem k množství zpracovávané látky většinou vyhovují diskontinuální mísiče a hnětače, neboť technologie výroby vyžaduje delší dobu zdržení v následujících procesech (kynutí, ležení, zrání, stabilizace, atp.). Proto je doba mezi dvěma cykly hnětení (a čištění) z pohledu provozu linky a technologie dostatečná. Vsádkové hnětače se konstruují jako otevřené nádoby a mají podobnou nevýhodu z hlediska těsnění pohyblivých elementů. Nicméně kontrola a ochrana výrobku funguje na stejném principu jako u výše popsaných dvousedlových ventilů pro potravinářský průmysl. Velkou nevýhodou diskontinuálních mísičů a hnětačů je složitá a těžká manipulace se zpracovávanou látkou, vzhledem k její vysoké hustotě.

Obr. 4-7 Hnětač těsta MARATON 145 - vlevo [Artos], horizontální tyčový hnětač T-1164 [Topos]

Doprava suroviny a produktu je realizována mechanizovanou cestou, kdy nádoba (díž) je transportována celá, nebo se její obsah vyklopí do přepravních zásobníků. V tom případě musí zařízení obsahovat i manipulační mechanizmus. Spotřeba energie mísičů a především hnětačů je vysoká, obzvláště při zpracování vysokoviskózních látek. Příkladem může být měrný příkon potřebný pro hnětení chleba, který se podle druhu, složení a kvality surovin pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,2 $kW.kg^{-1}$ [Muscalu, 2017] pro vertikální diskontinuální hnětač těsta, pro Z-mísiče 0,02 až 0,5 $kW.kg^{-1}$ [Paul, 2004].

Extrémních hodnot měrného příkonu dosahuje horizontální hnětač se dvěma hřídeli tvarovanými do šroubovice s průřezem ve tvaru trojúhelníka (Banbury), kde měrný příkon je až 6 $kW.kg^{-1}$ [Paul, 2004]. Posledně jmenovaný hnětač se používá spíše ve zpracovatelském průmyslu (tváření kaučuku), viz obr. 4-8.

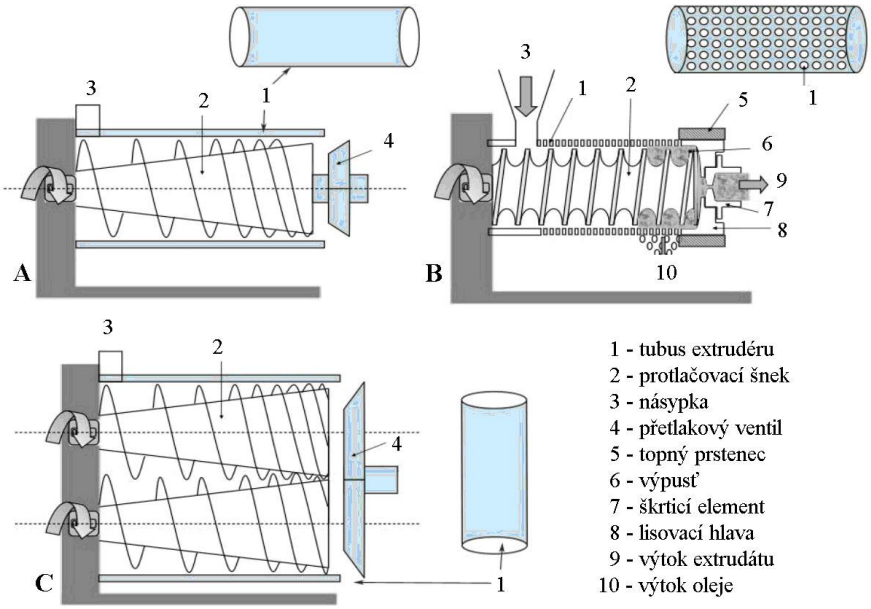


Obr. 4-8 Banbury hnětač – pracovní elementy [Mirshahidi, 2011]

Posledním velice frekventovaným typem procesu zpracování vysokoviskózních látek, který bude detailněji popsán, je **extruze**. V rámci technologie výroby může být provozována jen s dopravním zázemím, a to v případě jednokomponentní suroviny. Nebo je zařazena do linky

po míchání surovin. V obou případech se jedná o konečnou úpravu tvaru výrobku. Po ní již následují procesy spojené s transformací z těstovitého či pastovitého charakteru do struktury pevného nebo elastického tělesa. Tyto procesy jsou spojeny s odstraněním rozpouštědla, resp. tekuté složky směsi, a to buď fyzikální, nebo chemickou cestou, či jejich kombinací. Příkladem může být sušení, pečení, zrání, chemická reakce vytvářející pevné vazby mezi molekulami (vytvrzování, zesíťování). Posledním krokem bývá případné prodloužení trvanlivosti výrobku a balení v rámci potravinářského provoze.

Extruze představuje proces protlačování a tím formování tvaru látky vytlačovací hlavou extruderu. Typickým příkladem výrobků jsou těstoviny, cereálie, granule, cornflakes, bonbony, žvýkací gumy, potravinářská aditiva (proteiny) a přísady (granulovaný chmel), atp. Dopravním zařízením je stejně jako u zmiňovaných čerpadel píst nebo šnek. Látka je dopravována válcem, jehož stěny mohou být chlazené nebo temperované, k vytlačovací hlavě, která obsahuje požadovaný profil výrobku a zároveň představuje největší hydraulický odpor systému. Ve válci extrudéru může docházet k promíchání, hnětení, tření a ohřevu či chlazení. Extrudér může být opatřen přídavným dávkovacím systémem, kterým mohou být dopravována aditiva do prostoru válce [Singh, 2014]. Extruze může probíhat za studena, nebo při požadované teplotě úpravy výrobku (požadavky na tepelnou transformaci, vaření, pečení, atd.). Výrobkem extruze je nekonečný pás s požadovaným profilem. Hlava extruderu může být opatřena rotujícím nožem, který dělí výrobky na požadovanou délku (poměr rychlosti výtoku a otáček nože). Extrudery se nejčastěji vyrábějí v jedno nebo dvoušnekovém provedení.



Obr. 4-9 Jednošnekový A, dvoušnekový C extrudér a expeller B, [Savoir 2013, Kaválek 2018]

Obecně lze jedno šnekové extrudery rozdělit dle rozsahu smykových rychlostí na extrudery s nízkými 3 - 4 min^{-1}, středními 10 - 25 min^{-1} a vysokými otáčkami 30 - 45 min^{-1} [Singh, 2014]. Existuje mnoho dalších způsobů dělení extrudérů, například dle provozního tlaku (nízkotlaký středotlaký, vysokotlaký), nebo podle vlhkosti zpracovávaného materiálu, stejně tak jako existuje celá řada úprav těchto zařízení pro speciální aplikace – **expellery** pro listování oleje z rostlin a plodů [Savoir 2013, Kaválek 2018]. Každý z těchto extrudéru vyrábí produkt o jiných vlastnostech. Dvou šnekové extrudery lze rozdělit dle směru otáčení šneků na stejnoběžné a protiběžné. Výhodou těchto extrudérů je lepší samočistitelnost, lepší průběh mísení a vysoká produktivita [Singh, 2014]. V závislosti na tokových vlastnostech suroviny a požadavku na vlastnosti konečného výrobu (hmotnostní průtok) má měrný výkon rozsah několika řádu od

0,02 kW.kg^{-1} do 12 kW.kg^{-1}, tato data platí pro škrobový extrudát zpracovávaný za vysokých teplot [Colonna, 1989].

Zvláště u biologických látek při procesu extruze, který je charakterizován vysokým tlakem a vysokou teplotou (horká extruze), dochází k výrazním změnám struktury, ať již záměrně nebo jako nežádoucí efekt. Například v případě ohřevu škrobových suspenzí dochází k objemové expanzi za přítomnosti vysokého tlaku a teploty, kdy materiál zvětší svůj objem více než třikrát [Skočilas, 2010]. Další efekty jsou například spojeny s viskoelastickým chováním biomateriálu, jehož struktura je tvořena dlouhými řetězci makromolekul stejně jako u polymerů. Při nízkých hodnotách Reynoldsova čísla může dojít k expanzi či kompresi objemu kapaliny ve výstupním otvoru trysky (hlavy extruderu), označované jako „Die Swell“ nebo Barrův efekt [Steffe, 1996]. Podobným nežádoucím efektem je spontánní akumulace materiálu na čele hlavy extruderu, „Die Drool“ [Chaloupková 2007]. Viskoelastické chování se často negativně projeví na extrudovaném výrobku nestabilitou tvaru povrchu, například „Sarkskin effect“, tedy ekvidistantní zdrsnění nebo zvlnovatění povrchu, nebo tzv. „Necking“, který způsobí zúžení průřezu výrobku [Leonov, 1994]. Při procesu míchání můžeme pozorovat tzv. Weissenbergův efekt šplhání kapaliny po hřídeli míchadla [Steffe, 1996].

Podobné stroje a zařízení pracující na stejném principu lze nalézt v celé řadě dalších odvětví, typicky v chemickém, zpracovatelském (výroba a zpracování plastů, papíru) a farmaceutickém průmyslu, zpracování odpadů a čistíren vod až po biotechnologie i standardní strojírenskou výrobu. Existuje nekonečná řada specifických úprav těchto zařízení pro speciální účely, které nelze jednoduše a krátce postihnout a popsat. Výše uvedené stroje a zařízení jsou představiteli zpracovatelských strojů a zařízení pro výrobky s vysokou viskozitou v potravinářském průmyslu.

V textu jsou uváděny běžné měrné příkony pro daný proces, pro snadnou orientaci a porovnání mezi zpracovatelskými systémy. Jak ale určit příkon podobného stroje z provozních parametrů? Dále jsou uvedeny některé inženýrské rovnice zjištění příkonu navrhovaných strojů a zařízení.

4.1.3 Stanovení příkonu strojního vybavení

Základním integrálním parametrem návrhu strojů a zařízení je spotřeba energie, nutná k uskutečnění požadovaného procesu. Ta většinou vyplývá ze silových poměrů a interakcí mezi strojem a zpracovávanou látkou. Pro uvedené tři představitele strojního zařízení zpracování látek s vysokou viskozitou, tedy nádobu s míchadlem, hnětač a extrudér, lze nalézt v literatuře rovnice založené na semi-empirickém přístupu, kterými je definován příkon daného zařízení nebo lépe bezrozměrné kritérium ve formě příkonového čísla závislého na Reynoldsově čísle *Po = f (Re).*

Reynoldsovo číslo je pro míchaný systém definováno jako

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu} \tag{4.1}$$

kde ρ je hustota kapaliny, N jsou otáčky míchadla, d je průměr míchadla a μ je dynamická viskozita.

Pro rotační míchadla se používá definice příkonového čísla *Po* [Paul, 2003]

$$Po = \frac{P}{\rho N^3 d^5} \tag{4.2}$$

kde P je příkon míchadla, ρ je hustota kapaliny, N jsou otáčky míchadla a d je průměr míchadla. Pro stanovení příkonu, který bude pohánět míchadlo, je nutno znát tzv. příkonovou charakteristiku příslušného typu a tvaru míchadla a geometrii míchaného systému. Navíc se příkonová charakteristika liší v plouživém a turbulentním režimu, viz rovnice (4.3) pro plouživý režim a (4.4) pro turbulentní režim proudění newtonské kapaliny.

$$Po = \frac{A_m}{Re} \tag{4.3}$$

kde A_m je konstanta závisející na typu čerpadla a systému, Re je Reynoldsovo číslo.

$$Po = B = konst. \tag{4.4}$$

kde B je opět konstanta závisející na typu čerpadla a systému. Jak je vidět, v turbulentním režimu není příkonové číslo závislé na Reynoldsově čísle.

Pokud dosadíme za Reynoldsovo číslo z rovnice (4.1) a za příkonové číslo z rovnice (4.2) do rovnice (4.3) dostaneme tzv. bezrozměrný příkon, nebo také vyjádření konstanty A_m

$$P^* = \frac{P}{\mu N^2 d^3} = A_m \tag{4.5}$$

Turbulentní režim proudění se vyskytuje při zpracování vysokoviskózních látek zřídka, právě díky převažujícím viskózním silám. V případě nenewtonských kapalin se často používá mocninový model. Potom je příkonová charakteristika definována pro laminární režim proudění takto [Paul, 2004]

$$Po = \frac{A_m\, k_s^{n-1}}{Re_m} \tag{4.6}$$

kde A_m je konstanta závisející na typu čerpadla a systému z rovnice (4.3), k_s je tzv. Metzner-Otto konstanta, n je index toku modelu kapaliny a Re_m je modifikované Reynoldsovo číslo pro mocninovou kapalinu. Metzner-Otto koncept předpokládá, že v plouživém toku kapaliny v blízkosti míchadla lze definovat střední rychlost deformace, která je přímo úměrná součinu otáček míchadla a konstanty k_s. Definice Reynoldsova čísla potom vychází z inspekční analýzy

$$Re_m = \frac{N^{2-n} d^2 \rho}{K} \tag{4.7}$$

kde K je koeficient konzistence modelu kapaliny.

Konstanta A_m v rovnici (4.6) závisí pouze na geometrii systému, nikoliv na viskozitě zpracovávané látky. Nicméně stanovení Re pro nenewtonské kapaliny je složité, vzhledem k tomu, že zdánlivá viskozita není konstantní, ale závisí na rychlosti smykové deformace pro čistě viskózní látky. Proto se v praxi často používá koncept navržený Metznerem a Ottou [Metzner, 1955], kde zdánlivá viskozita je stanovena na základě efektivní smykové rychlosti, která je úměrná otáčkám míchadla N a konstantně k_s, která je funkcí geometrie systému a jen omezeně závislá na reologických vlastnostech čistě viskózních látek [La Fuente, 1997; Reiger 1973]

$$\dot{\gamma}_{eff} = k_s N \tag{4.8}$$

Zdánlivá viskozita mocninového modelu je definována rovnicí, K je koeficient konzistence a n je index toku

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \tag{4.9}$$

pokud dosadíme za rychlost deformace z rovnice (4.8) do rovnice (4.9)

$$\eta = K(k_s N)^{n-1} \tag{4.10}$$

Reynoldsovo číslo po dosazení zdánlivé viskozity

$$Re = \frac{\rho N^{2-n} d^2}{K k_s^{n-1}} \tag{4.11}$$

potom příkonovou charakteristiku lze napsat ve tvaru

$$P_0 \frac{\rho N^{2-n} d^2}{K} = C k_s^{n-1} = C(n) \tag{4.12}$$

Zobrazíme-li rovnici (4.12) v logaritmických souřadnicích, potom příkonová charakteristika k_s je dána směrnicí přímky v tomto grafu [Rieger, 1973].

Inženýrské rovnice lze nalézt také pro pomaloběžná míchadla a hnětací stroje, kde důležitou roli hraje mezera mezi pracovním elementem a stěnou. Pro tato zařízení zpracovávající látky s vysokou viskozitou lze stanovit potřebný příkon na základě předpokladu, že pro malou mezeru mezi lopatkou a stěnou převládají viskózní síly, z následující rovnice pro newtonské látky [Paul, 2003]

$$P = \frac{\alpha d^3 L_L N^2 \mu}{t_L} \tag{4.13}$$

kde α je konstanta závisející na typu a tvaru pracovního elementu a na geometrii systému, d je průměr rotujícího elementu, L je délka lopatky, N jsou otáčky pracovního elementu, μ je dynamická viskozita zpracovávané látky a t je mezera mezi stěnou a lopatkou.

A pro látky popsané mocninovým modelem s indexem toku n

$$P = \alpha K d^3 N^{1+n} \tag{4.14}$$

Poslední v úvodu uvedené zařízení byl extrudér. V jeho případě závisí návrh stroje na zaměření procesu výroby. Pokud se jedná čistě o dopravní zařízení, které není vybaveno kompresní zónou a vytlačovací hlavou, lze příkon charakterizovat stejnou rovnicí (4.5) [Tadmor, 2006].

Pro předpoklad izotermního chování zařízení lze odvodit příkonovou charakteristiku vytlačovacího stroje

$$P^* = \gamma L^* + a_s \Delta p^* \tag{4.15}$$

kde γ je koeficient zahrnující geometrii šneku a komory (stoupání, průměry, vůle), L^* je bezrozměrná délka šneku, a_s je parametr zohledňující vliv bočních stěn šneku, křivosti, atp. a Δp^* je bezrozměrná tlaková ztráta šneku.

V převážné většině případů je však nejdůležitější částí extrudéru jeho hlava. Ta dává finální tvar výrobku ve formě nekonečného pásu. Do jedné hlavy může být zároveň přivedeno i více

tekutých materiálů z více šneků. Pracovní činností takové hlavy potom není mísení těchto proudů (to je hlavní funkce šneku – například promísení barviva), ale jejich vzájemné spojení a vytvoření kompozitní sendvičové struktury (spojení těsnění s profilem okenního rámu) nebo nanesení materiálu na tažené vlákno (povlakování drátů a lanek – výroba kabelů, části pneumatik, atp.). Tyto hlavy jsou významně konstrukčně složitější a jejich návrh se neobejde bez použití softwaru pro simulaci toku. Výše zmíněná řešení jsou k vidění spíše ve spotřebním či elektrotechnickém průmyslu než v potravinářství. V případě potravinářského průmyslu se speciální hlavy používají pro výrobu tzv. extrudovaných výrobků, kde je směs v hlavě zahřívána a v ústí hlavy expanduje do požadovaného tvaru. Typickým příkladem použití extrudéru s tvarovací hlavou je výroba těstovin.

Tok kapaliny s vysokou viskozitou úzkou kapilárou v hlavě extrudéru vytváří extrémní hydraulický odpor, který je nutné překonat. Tato hydraulická ztráta je potom hlavním návrhovým parametrem zařízení. Pro vytvoření potřebného tlaku pro překonání hydraulického odporu hlavy je zařazena do těla šneku tzv. kompresní zóna, která změnou stoupání šroubovice a zvětšováním průměru jádra šneku, dopravovaný materiál zároveň stlačí.

Obr. 4-10 Hlava extrudéru pro výrobu těstovin (nerezová ocel, teflon, bronz) [De Mari]

Pro výpočet tlakové ztráty toku newtonské kapaliny v potrubí, resp. kapiláře kruhového průřezu, se používají standardní vztahy, např. Darcy-Weissbachova rovnice [Chhabra, 1999]

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{\bar{u}^2 \rho}{2} \tag{4.16}$$

kde λ je součinitel hydraulického tření, který závisí na Reynoldsově čísle, L je délka potrubí či kapiláry, $\bar{u}$ je střední rychlost proudění, D je průměr potrubí či kapiláry a ρ je hustota látky.

V případě nekruhového proudění lze použít koncept tzv. hydraulického průměru, který však má svá omezení pro průřezy, kde poměr průtočné plochy k smáčenému obvodu je malý (typicky potrubí s vnitřním žebrováním – výparníky tekutých plynů, hvězdicovitý vnitřní tvar potrubí – extruze produktu s vnějším reliéfem)

$$D_h = \frac{4S}{O} \tag{4.17}$$

kde S je průtočný průřez potrubí nebo kapiláry, O je smáčený obvod. Pro nekruhové profily existují i přesnější vztahy založené na analytickém řešení nebo empirické vztahy stanovené dle systematických experimentů [Chhabra, 1999]. Častěji však látky v potravinářském průmyslu vykazují nenewtonské chování. V běžné inženýrské praxi se používá reologický model

mocninné kapaliny, nebo model s mezí toku Binghamův či Herschel-Bulkley model [Barnes, 1989].

Tlaková ztráta toku látky popsané mocninovým modelem pro laminární režim toku v kruhovém potrubí lze stanovit z rovnice [Barnes, 2000]

$$\Delta p = \frac{2KL}{R}\left[\frac{\dot{Q}}{\pi R_p^3}\left(3+\frac{1}{n}\right)\right]^n \tag{4.18}$$

kde K je koeficient konzistence, n je index toku kapaliny, tedy parametry mocninového modelu, L je délka potrubí, resp. kapiláry, R_p je poloměr potrubí, $\dot{V}$ je objemový průtok kapaliny.

Pro nekruhové potrubí existují semi-empirické vztahy pro výpočet tlakové ztráty [Chhabra, 1999]. Z tlakové ztráty lze stanovit potřebný výkon pohonu zařízení a provést pevnostní výpočty jednotlivých částí stroje.

Shrnutí kapitoly

Pokud bychom chtěli učinit konkrétní závěry a doporučení použitelné pro návrh těchto strojů a zařízení pro strojního procesního inženýra, je zcela zřejmé, že rozhodující bude velikost interakce látky a stroje. Ta přímo souvisí s charakterem, resp. materiálovými vlastnostmi zpracovávané látky a režimem toku. Je tedy nesmírně důležité tyto obtížně identifikovatelné a měnící se parametry znát. Zvláště, pokud se jedná o látky s vysokou viskozitou, jejichž chování ve většině případů nelze popsat Newtonovým zákonem a z hlediska provozu jsou velice energeticky náročné. V takové chvíli nastupují nástroje měření, které tyto parametry určí – reometrie, součást vědního oboru reologie.

Druhým neméně důležitým a zmiňovaným aspektem, který s sebou nese aplikace zařízení v potravinářském průmyslu, je hygienický návrh stroje. Ten by měl zaručit snadnou čistitelnost vnitřních prostor stroje, zamezit kontaminaci pracovního prostoru, zajistit bezzávadnost výsledného produktu s ohledem na spotřebitele a samozřejmě vyhovět legislativě v lokalitě provozu.

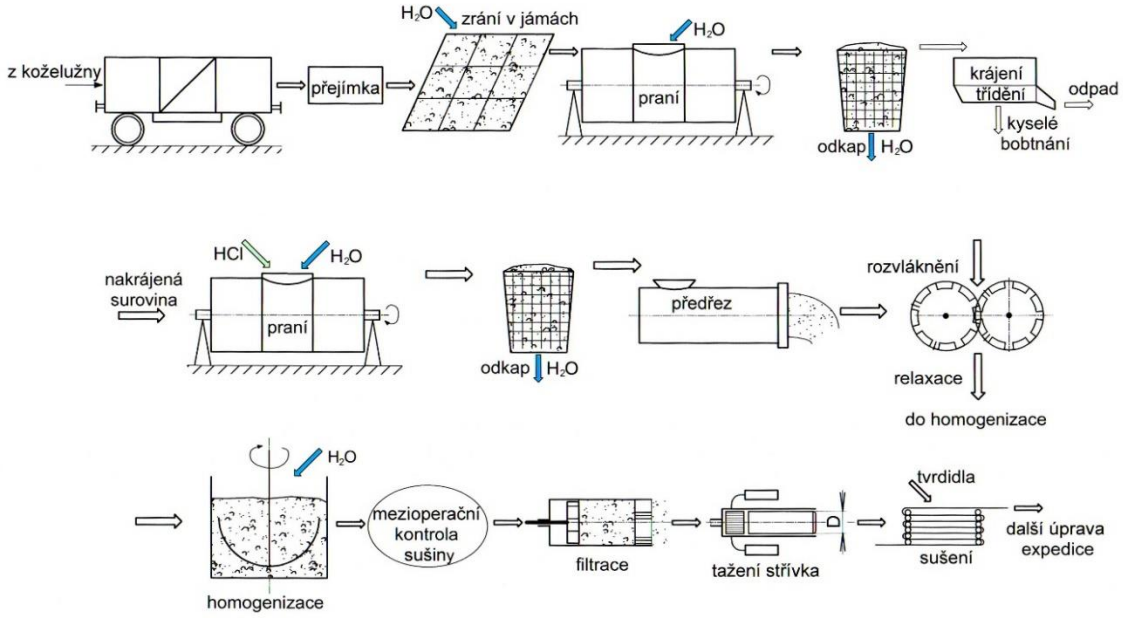
4.2 PŘÍKLAD NÁVRHU ZAŘÍZENÍ

Z vlastní praxe lze uvést příklad návrhu zařízení pro zpracování vysokoviskózní látky. Zařízení má sloužit k rovnoměrné distribuci barvy do kolagenní hmoty o vysoké koncentraci sušiny kolagenu až 8 % hmotnostních. Zařízení je součástí linky na výrobu umělých střev. Při takto vysoké koncentraci kolagenu má již zpracovávaná látka pastovitý či těstovitý charakter. Na zařízení byly kladeny podmínky jak z hlediska výkonu, resp. požadovaného průtoku hmoty, tak na účinné chlazení, neboť kolagen je termolabilní látka s vysokou viskozitou. Surovina byla charakterizována jako čistě viskózní nenewtonská látka. Zařízení mělo nahradit stávající technologii, s očekávaným přínosem ve snížení doby zpracování a tím zvýšení produkce. Zařízení mělo být navrženo jako kontinuální a zařazeno do výrobní linky.

4.2.1 Technologie výroby

Pro návrh zařízení je nutno seznámit se s technologií výroby. Výroba umělých střívek pro masný průmysl z kolagenní hmoty je ukázána na obr. 4-11. Proces extrakce kolagenu z kůže probíhá v několika fázích. Nejprve se ošetří surovina, často uskladněním a konzervací (vápněním), než dojde k jejímu zpracování. Při zpracování se odstraní vnější kůže a podkoží je naloženo do silně zásaditého či kyselého rozpouštědla (NaOH nebo NaCl), čímž se docílí rozkladu příčných vazeb mezi řetězci [Schmidt, 2016]. Následuje hydrolýza, kdy se z připravené směsi extrahuje kolagen. Důležitými parametry hydrolýzy je pH a teplota,

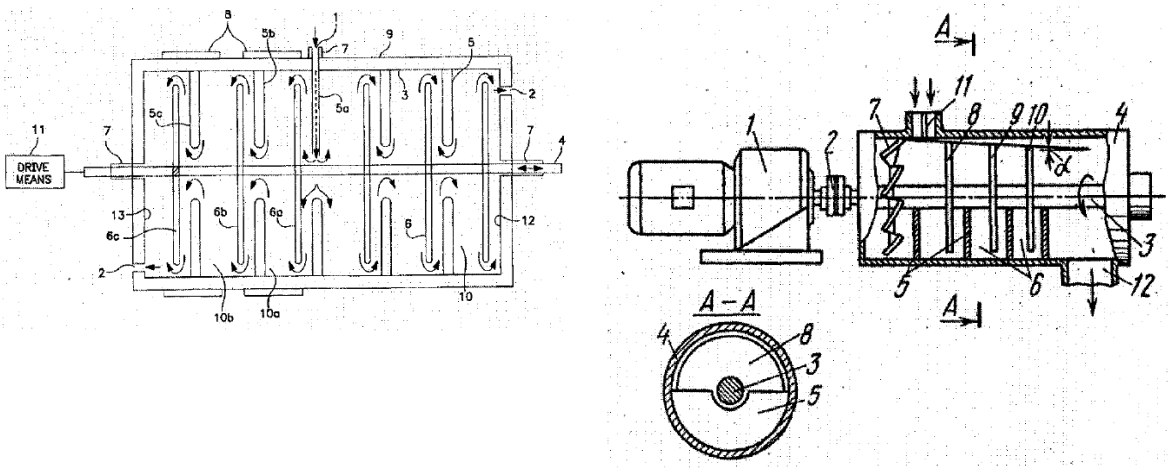
[Schmidt, 2016]. Následně je hmota mechanicky dezintegrována a hnětena do podoby těsta. Kolagen poté prochází kontinuálním mísičem. Do vstupního potrubí tohoto zařízení je nastřikována barva (vodný roztok) ve velmi malé koncentraci. Na výstupu je sledována homogenita barvy, která určí, zda je barva dostatečně rozptýlená ve hmotě. Barevná hmota putuje do vytlačovací linky, kde se vyrábějí střívka.



Obr. 4-11 Technologie výroby kolagenových střev [Přidal, 1988]

4.2.2 Stroje a zařízení pro danou technologii

Při literární rešerši vlastností kolagenní hmoty s tak vysokou hodnotou sušiny (8 %) nebyla nalezena žádná data. Nicméně k popisu suroviny nám poslouží provedené experimenty popsané v předešlých kapitolách. Proto byla provedena především patentová rešerše zaměřená na zařízení pro míchání vysokoviskózních látek [Krátký, 2014]. Z ní vyplynulo, že pro požadovanou látku a proces, tedy zamíchání barvy, nikoliv hnětení látky, bude nejvhodnější jednorotorový mísič vlastní konstrukce typu rotor-stator, vzhledem k jeho jednoduchosti, snadné regulaci během provozu a výrobním možnostem zadavatele. Příklady nalezených koncepcí jsou uvedeny na obr. 4-12.



Obr. 4-12 Možné případy řešení návrhu stroje-hnětače, vlevo [Kurtz, 1998], vpravo [Vasilijevič, 1983], [Krátký, 2014]

Systém je sestaven z jednoho hřídele, na kterém jsou umístěny pracovní elementy ve tvaru dutých disků (chlazení) a válcové komory. Prostor mezi disky je rozdělen přepážkami spojenými s pláštěm. Zpracovávaná látka se pohybuje nejen axiálně, ale v každé komoře také radiálně směrem od pláště k hřídeli a zpět. Druhé zařízení pracuje obdobně, jen je rozděleno na podávací a mísící sekce, ve kterých jsou různé typy pracovních elementů založené na tvaru disku.

4.2.3 Materiálové vlastnosti kolagenu

Důležitým parametrem procesu jsou tokové vlastnosti zpracovávané látky. Pro účely navržení stroje a ověření provozních hodnot při zkušebních testech, byly použity hodnoty získané z experimentů na kapilárním vytlačovacím reometru stejným způsobem, jako bylo popsáno v předchozích kapitolách. Barva představovala vodný roztok, který se ve velmi nízké koncentraci vstřikoval do vstupního potrubí zařízení. Vzhledem k velmi blízkým vlastnostem vody a malé koncentraci, byl vliv barviva na celkový potřebný příkon zařízení zanedbán. Kolagen by popsán mocninovým modelem, jehož parametry a hustota hmoty jsou uvedeny v tab. 4.4.

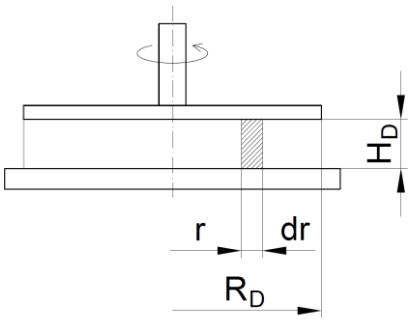
Tab. 4.4 Vlastnosti kolagenní hmoty použité při zkušebních testech, platnost v rozsahu smykových rychlostí 200-2500 1/s

Obsah sušiny	**Hustota**	**Index toku *n***	**Koef. konzistence**
[kg.kg^{-1}]	[kg.m^{-3}]	[-]	[Pa.s^{n}]
7.7 %	1100	0,22	1500

4.2.4 Popis mechanismů procesů uvnitř zařízení

Při identifikaci základních procesů je třeba vycházet z již zjištěných faktů a požadavků na zařízení. Hlavním požadavkem provozu zařízení je homogenita barvy ve zpracovávané hmotě. Barvu je třeba v zařízení rozbít na co nejmenší kapičky, které se následně promíchají s hmotou. Tu je také nutné šetrně rozdělit na menší části a zamíchat v ní barvu.

Z hlediska vlastnosti produktu je důležité zachovat dlouhá kolagenní vlákna, není možno látku namáhat střihem ale jen smykem. Hlavním procesem zpracování bude míchání, které je v případě totoho zařízení výsledkem dispergace a homogenizace. V obou zařízeních nalezených patentovou rešerší je vidět relativně malá mezera mezi rotorem a statorem, což poukazuje na smykové namáhání zpracovávané látky.



Obr. 4-13 Smykový tok v mezeře mezi rotujícím diskem a pevnou stěnou

Pro dosažení procesu dispergace je nutno zvolit zjednodušení, nejlépe ve formě popisu čistě smykového pohybu kapaliny v mezeře mezi rotujícím a pevným diskem. Technická realizace dispergace je patrná z patentové rešerše, kde většina zařízení je navržena ve formě rotor (disk)

a stator (stěna tělesa zařízení). V mém případě předpokládám plouživé proudění v zařízení. Interakce látky, statoru a rotoru lze zjednodušit na případ toku látky mezi pevným a rotujícím diskem obr. 4-13.

Druhým procesem, který je nutno v mísiči realizovat, je homogenizace barvy v kolagenní hmotě. V případě homogenizace je nutno překonat odpor látky vůči toku a odpor recirkulačního proudění uvnitř míchaného prostoru. Součástí výkonu pro homogenizaci bude i výkon na dispergaci. Vzhledem k pohybu míchadla budou tyto procesy probíhat současně. Jednou z možností je nahradit rotující disk standardním míchadlem (například čtyřlopatkovým míchadlem se šikmými lopatkami). Na základě těchto předpokladů lze stanovit návrhové parametry stroje.

4.2.5 Výkon zařízení

Požadovaný průtok kolagenní hmoty byl 6 kg.min^{-1} a průtok barvy 15 l.h^{-1}. Barva představuje nízkokoncentrovaný vodný roztok pigmentu s předpokládanými vlastnostmi vody. Ohřátí kolagenu nesmí být vyšší než ΔT = 15 °C. Původní zařízení má parametry: výkon 2,4 – 5,2 kW, resp. měrnou energii pro zpracování 14 - 30 kJ.kg^{-1} [Krátký, 2014], dle obsahu sušiny v kolagenní hmotě.

Při návrhu zařízení je nutno postupovat od stanovení provozních parametrů stroje (výkon, otáčky, krouticí moment) po geometrické uspořádání. Provozní parametry lze odhadnout na základě dat z literatury pro podobné procesy, nebo ze základních principů odehrávajících se v zařízení.

Pro stanovení výkonu zařízení, můžeme použít doporučení z literatury, kde se uvádí pro podobná zařízení výkon vztažený na jeden kilogram zpracovávané látky. Další možností je požít zjednodušení pro výpočet výkonu při smykovém proudění mezi rotující a pevnou deskou (jen proces dispergace). Tuto rovnici lze jednoduše odvodit pro mocninový model kapaliny

$$P = \frac{2\pi}{3+n}\frac{\omega^{1+n}}{H_d^n}KR_D^{3+n} \tag{4.19}$$

kde ω je úhlová rychlost, n je index toku kapaliny, H_d je vzdálenost desek, K je koeficient konzistence a R_D je poloměr rotující desky. Po úpravě můžeme rovnici přepsat do tvaru

$$P = Z\frac{N^{1+n}}{H_d^n}R_D^{3+n} \tag{4.20}$$

kde Z je konstanta zahrnující materiálové parametry a N jsou otáčky. V případě, že bychom uvažovali proces míchání, lze příkon zařízení stanovit z rovnice

$$P = A_m k_s K d^3 N^{1+n} \tag{4.21}$$

kde konstanty A_m a k_s je nutno odhadnout na základě podobné geometrie míchacích elementů, d je průměr míchadla. Součin konstant $A_m.k_s$ pro hnětače se spirálovými elementy uvádí [Carreu, 1993] v rozsahu hodnot 120 až 192.

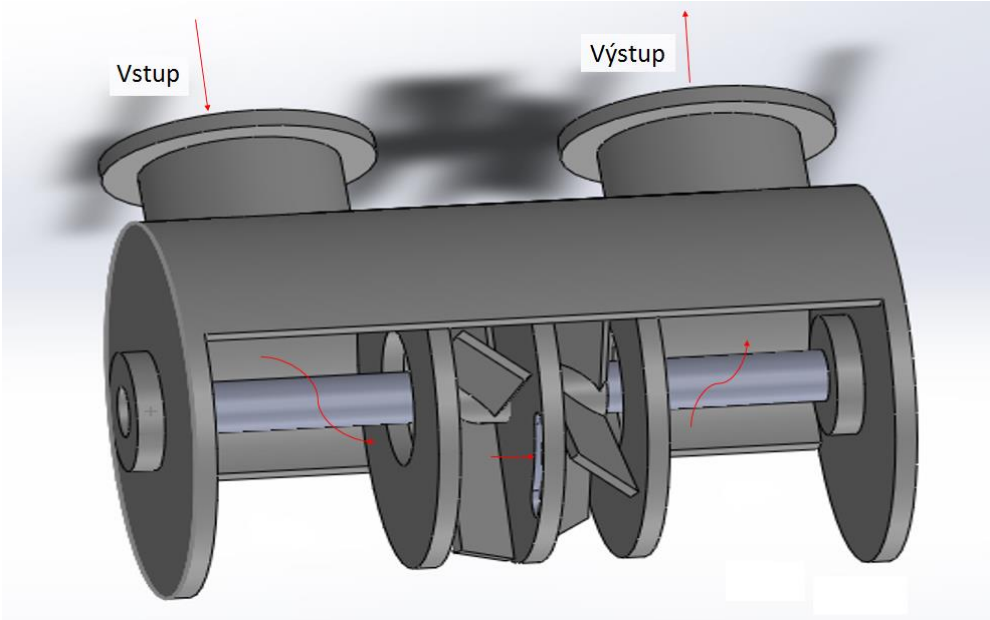
Pro odhadnuté maximum otáček 500 min^{-1}, velikost zařízení R = 100 mm a odhadnutou konstantu k_s, byl stanoven maximální výkon zařízení 6 kW. Pro výpočet byla použita rovnice (4.21). Pro samotný proces dispergace vychází výkon desetkrát menší. Při použití lopatkových míchadel bude docházet k dispergaci mezi rotující lopatkou a pevným diskem, tzn., že malou

částí potřebného výkonu pro míchání bude i výkon pro dispergaci. Navržený model zařízení je schematicky uveden na obr. 4-14.

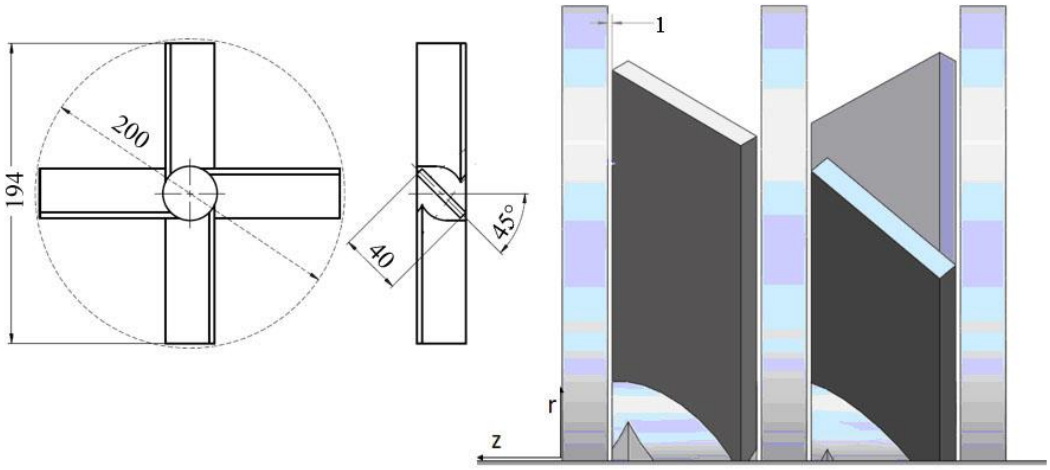
Zařízení se skládá z pláště a rotoru. Plášť je válcový, opatřený vstupními a výstupními otvory s přírubami orientovanými kolmo na osu válce. Zařízení je provozováno s osou rotoru v horizontálním směru. Na rotoru jsou instalovány pracovní elementy, které rozdělují vnitřní prostor komory na vstupní část, pracovní část a výstupní část. Pracovní část je tvořena třemi disky upevněnými k plášti zařízení a dvěma lopatkovými míchadly. Lopatky jsou čtyři, skloněné pod úhlem 45°, viz obr. 4-14. Vnější disky jsou opatřeny průchody v blízkosti hřídele a prostřední disk má po obvodu čtyři drážkové díry, umístěné co nejblíže stěny pláště. Kolagenní hmota tedy nejprve prostupuje otvorem okolo hřídele, je míchána lopatkami prvního míchadla, putuje radiálně směrem od hřídele k plášti, prochází čtyřmi otvory v prostředním disku, je míchána druhým míchadlem a proudí směrem od pláště k hřídeli mezi lopatami a vystupuje z pracovní části otvorem mezi hřídelem a krajním diskem. Zařízení je navrženo tak, aby bylo možno nastavit axiální mezeru mezi lopatkami a disky [Krátký, 2014], viz obr. 4-14. Plášť míchadla byl vyroben ve formě duplikátoru, ve kterém proudí chladicí voda.

Velikost vnitřního pracovního prostoru byla navržena v těchto rozměrech: průměr 200 mm, délka válcové komory 300 mm. Rozsah tlakové ztráty zařízení 0,5 – 2 MPa, byl stanoven zjednodušeným výpočtem (odhad místních ztrát dle toku ekvivalentního potrubí), dle rozsahu obsahu sušiny a tomu odpovídajícím reologickým parametrům kolagenu. Zařízení bylo vyrobeno a instalováno ve zkušebně zadavatele, kde byly provedeny první zkoušky a následné drobné úpravy.

Dle známé geometrie a vlastností zpracovávané látky lze stanovit Reynoldsovo číslo pro rozsah zkušebních otáček, které byly 150, 300 a 500 min^{-1}. Reynoldsovo číslo dle rovnice (4.7) bylo stanoveno v intervalu 0,15 až 1,28.



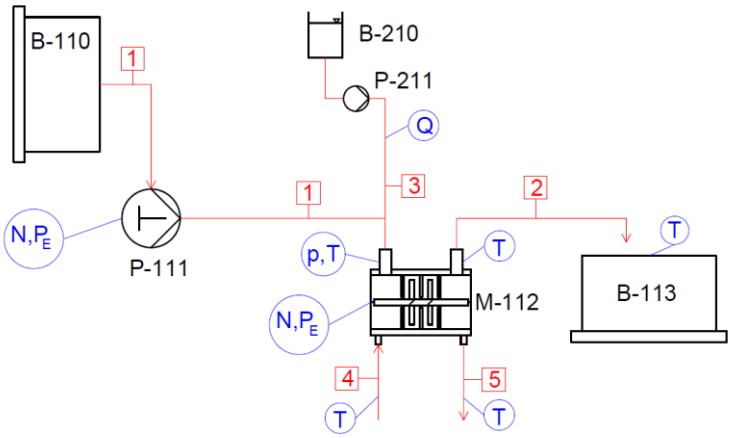
Obr. 4-14 Model navrženého mixéru, směr toku kolagenu je naznačen červenými šipkami [Ayas, Skočilas, et al 2018]



Obr. 4-15 Rozměry míchadla a mezery mezi míchadlem a diskem [Ayas, Skočilas, et al 2018]. Průměr míchadla je 194 mm.

4.2.6 Poloprovozní experiment

Zkušební provoz zařízení byl realizován na testovací lince zadavatele. Míchací zařízení bylo zásobováno vlastním čerpadlem zadavatele o výtlaku 8 bar. Tlaková ztráta zařízení byla měřena tlakovým čidlem ve vstupním potrubí, výstup ze zařízení byl do atmosférického tlaku (hadice a sběrná nádoba). Zároveň bylo sledováno ohřátí zpracovávané látky, teploměry instalovanými na vstupu a výstupu do zařízení. Duplikátorový plášť byl připojen na okruh chladicí vody. Pro pohon zařízení byl použit motor o výkonu 5,5 kW s frekvenčním měničem. Byly provedeny testy s konstantním průtokem kolagenní hmoty, ale s různými otáčkami hřídele a míchadel (frekvenční měnič) a s různou velikostí mezery mezi míchadlem a diskem. Jak již bylo řečeno, účel zařízení není čerpání kapaliny, ale její promíchání s barvou. Homogenita barvy byla následně zjišťována optickými metodami z řezu vytlačené obarvené kolagenní hmoty. V závislosti na stupni homogenity rozmíchané barvy, byla hmota znovu protlačena experimentálním zařízením bez dávkování barvy. Z vyhodnocení požadované homogenity barvy, resp. počtů nezbytných průchodů zařízením, je možno navrhnout minimální počet míchacích elementů zařízení. Kromě homogenity barvy byl sledován i disipovaný měrný výkon ve zpracovávané hmotě pro různé otáčky rotoru a nastavenou mezeru mezi statorem a rotorem.



Obr. 4-16 Procesní schéma zkušebního provozu navrženého míchadla. Měřené veličiny, N – otáčky, p – tlak, T – teplota, Q – průtok, P_E – elektrický výkon

Celá dávka (cca 100 kg) kolagenní hmoty (proud 1 – průtok 6 kg.min^{-1}) pro jeden průchod míchadlem byla vyklopena ze zásobníku B-110 do čerpadla P-111. Kolagenní hmota byla dopravena čerpadlem do experimentálního míchadla M-112. Na vstupu do míchadla byla nastřikována barva (proud 3 – průtok 0,25 kg.min^{-1}) čerpadlem P-211 ze zásobníku barvy B-210. Obarvená kolagenní hmota vytékala do zásobníku B-113. Plášť experimentálního míchadla byl chlazen vodou (proud 4 a 5). V případě požadavku lepší homogenity barvy bylo provedeno více průchodů obarvené hmoty míchadlem. V tom případě sloužily střídavě zásobníky B-110 a B-113 k dávkování hmoty do čerpadla P-111 a ke sběru kolagenní hmoty za experimentálním míchadlem M-112.

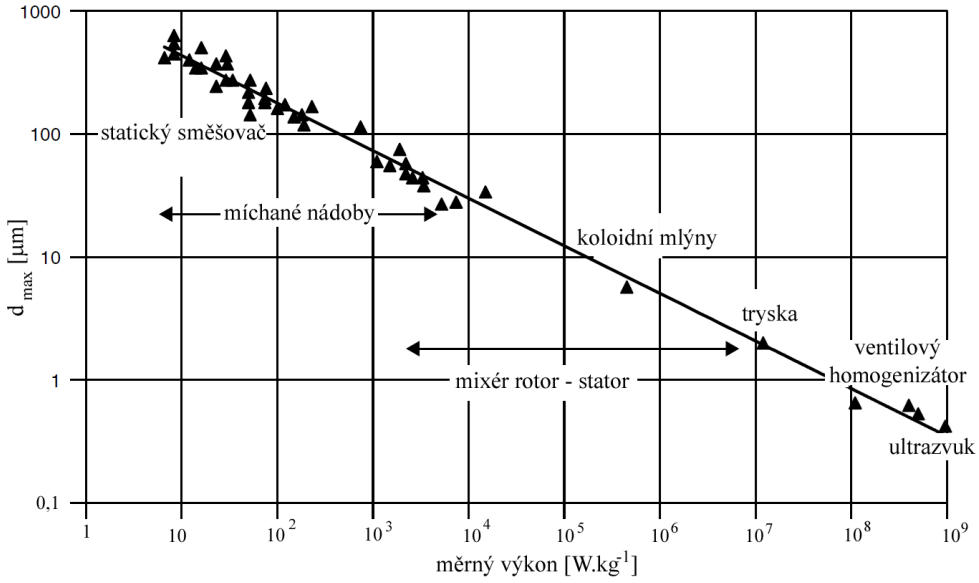
Experimenty byly provedeny pro kombinaci tří hodnot otáček rotoru 150, 300 a 500 min^{-1} a dvou axiálních mezer mezi diskem statoru a lopatkou rotoru 1 a 3 mm. Měřenými parametry byly vstupní tlak do zařízení (výstupní tlak byl považován za atmosférický), výkon zařízení (zobrazený na frekvenčním měniči), ohřátí hmoty rozdílem vstupní a výstupní teploty. Data z experimentů jsou uvedena v tab. 4.6.

Ačkoliv je primárním úkolem zařízení míchání, resp. homogenizace barvy v hmotě, orientace toku látky a natočení míchadel způsobuje i axiální čerpání látky zařízením. Celkový naměřený výkon se skládá ze spotřeby energie na čerpání a míchání plus dispergaci látky. Pro vyhodnocení disipované energie v míchané hmotě čistě pro proces míchání je třeba tyto příspěvky oddělit. Z analýzy tlakové ztráty a průtoku zařízení vyplývá, že k čerpání látky je potřeba méně než 3 % z celkové spotřebované energie. Disipovaný výkon dle velikosti otáček se pohyboval v rozmezí od 0,7 do 2,9 kW.kg^{-1}, což odpovídá rozsahům podobných strojů a zařízení.

Tab. 4.6 Naměřená data z měření na poloprovozním zařízení

Mezera [mm]	**Otáčky [min^{-1}]**	**Vstupní tlak [kPa]**	**Výkon míchadla [kW]**	**Ohřátí hmoty [°C]**
3	150	600	1.27	1.7
3	300	600	2.67	4.3
3	500	600	4.65	8.1
1	150	610	1.31	1.6
1	300	603	2.79	4.4
1	500	508	4.73	8.2

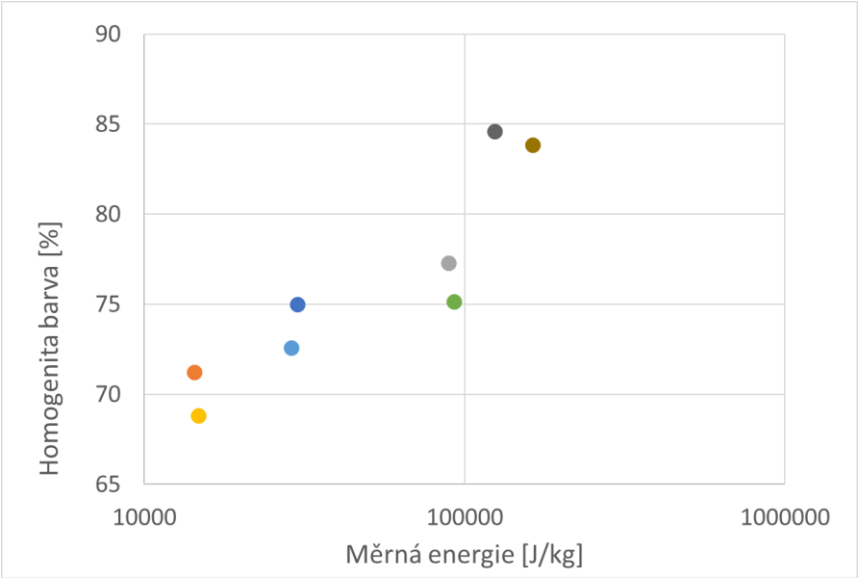
Pro ilustraci uvádím závislost vynaložené měrné energie potřebné pro dispergaci kapičky o požadovaných rozměrech, viz obr. 4-17. Tato závislost byla naměřena pro kapičky oleje ve vodě. Podobný trend lze očekávat také u kolagenu, tedy s klesajícím rozměrem částice zpracovávané látky roste měrný příkon zařízení.



Obr. 4-17 Závislost maximální velikosti částice při procesu dispergace na potřebném měrném výkonu pro její vytvoření příslušným zařízením [Davies, 1987].

Z naměřených dat je zřejmé, že vliv axiální mezery ve vyšetřovaném rozsahu na disipovaný výkon je oproti otáčkám minimální. Rozdíl příkonů je minimální a pohybuje se do 4 % pro ekvivalentní kombinace. Naopak vliv otáček je dominantní. To lze vysvětlit právě analýzou procesů odehrávajících se v zařízení. Z rovnic pro dispergaci (4.19) a (4.20) a míchání (4.21) vyplývá, že měrný výkon závisí hlavně na otáčkách zařízení, méně na mezeře mezi statorem a rotorem pro plouživý režim proudění, tj. pro malá Reynoldsova čísla

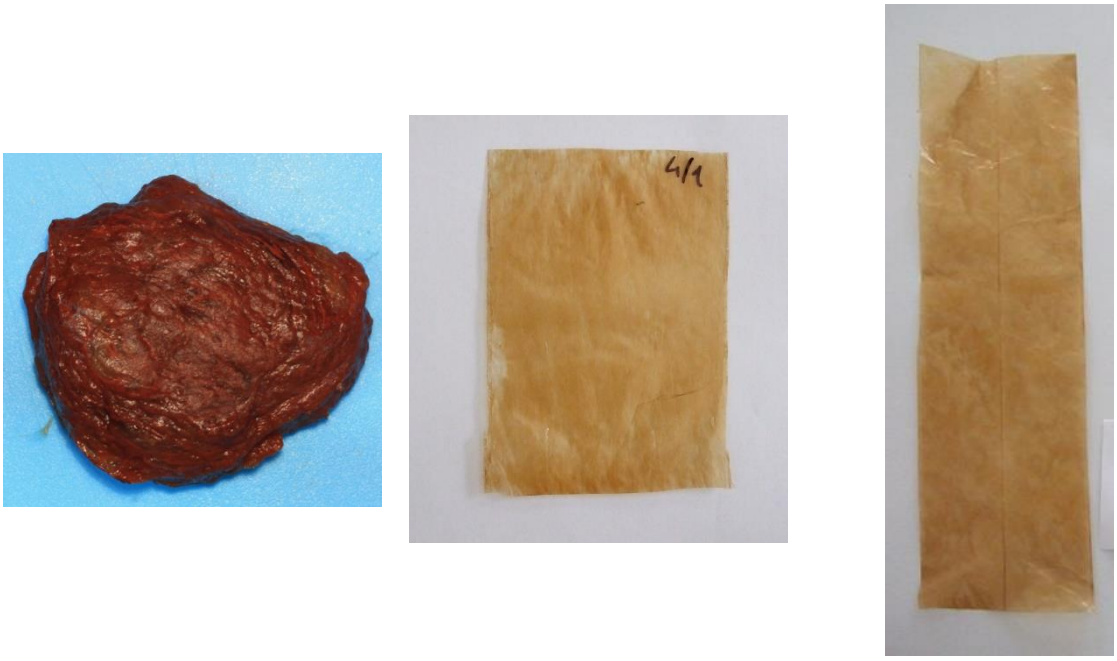
$$P \approx f(N^{1+n}, H_d^{-n}) \tag{4.1722}$$



Obr. 4-18 Závislost homogenity barvy produktu na měrné energii systému, nejvyšší hodnoty měrné energie odpovídají třem průchodům hmoty mísičem

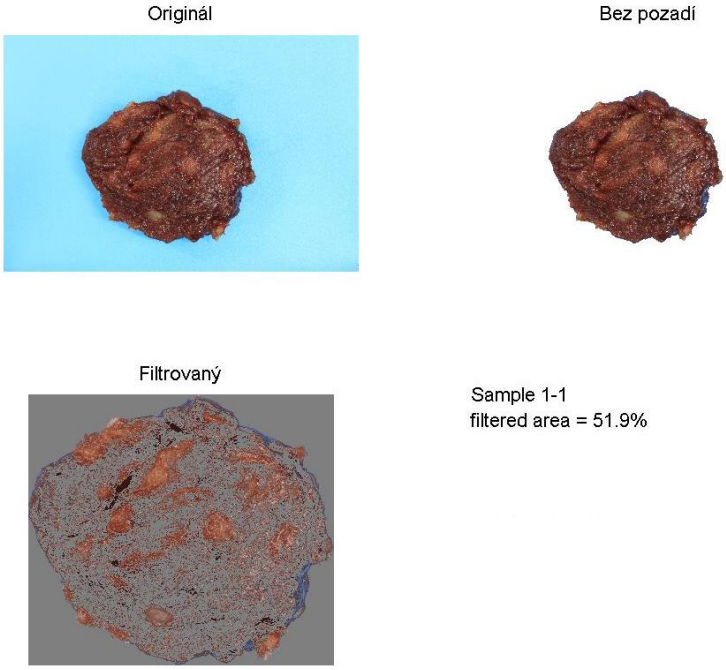
Z vyhodnocení experimentů vyplynulo, viz obr. 4-18, že pro dosažení požadované homogenity barvy v kolagenní hmotě jsou nezbytné **tři průchody** zpracovávané látky zařízením při otáčkách 500 min^{-1}. Obr. 4-18 představuje vyhodnocení závislosti homogenity barvy produktu na měrné energii systému. Homogenita produktu byla vyhodnocována vlastním nekomerčním

externím programem, kde se v podstatě měřila velkost odchylky barev jednotlivých bodů od průměrné barvy snímaného obrazu a vychází z metodiky CIE Lab, která se používá v potravinářském průmyslu (např. pro hodnocení barevnosti masa). Body s nejnižší homogenitou odpovídají jednomu průchodu látky s nejnižšími otáčkami 150 min^{-1} a největší mezerou 3 mm. Body s nejvyšší dosaženou homogenitou barvy odpovídají třem průchodům látky zařízením s nejvyššími otáčkami rotoru 500 min^{-1} a nejmenší mezerou mezi statorem a rotorem 1 mm.



a) b) c)

Obr. 4-19 Fotografie a) barevné hmoty, b) vyrobéné fólie, c) vyrobeného umělého střeva



Obr. 4-20 Výstup vlastního programu hodnocení měření homogenity barvy, filtered area – představuje relativní plochu homogenní barvy

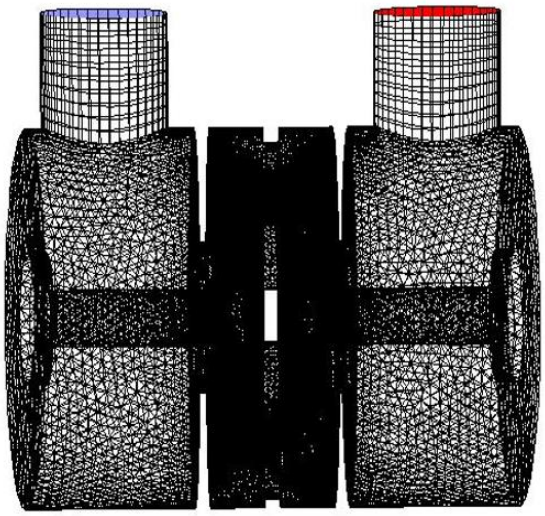
Homogenita barvy byla vyhodnocována z fotografie řezu kolagenní hmoty a produktu (umělého střeva). Snímek byl zpracován vlastním skriptem v programu Matlab s využitím metod zpracování obrazu, obr. 4-20. Homogenita barvy byla definována jako podíl počtu pixelů nejvíce zastoupené barvy (po filtraci barev snímku) k celkovému počtu pixelů vzorku. Tato hodnota byla následně porovnána s požadavky zpracovatele, resp. s výsledky jeho vlastní metodiky pro stanovení homogenity barvy. Fotografie barevné hmoty, vyrobené fólie z hmoty (vlastní metodikou zpracovatele) a umělého střeva, jsou uvedeny na obr. 4-19.

Zpracovatel také hodnotil homogenitu barvy dle vlastní metodiky, která vychází s historicky předepsaných postupů zpracování. Hodnotil jak barevnost hmoty, tak barevnost umělého střeva. Barevnost zpracovatel měřil spektrometrem Spectrophotometer CM-5. Metodika zpracovatele byla založena na empirickém vztahu mezi parametrem barevnosti a počtem reklamací produktu. Podle toho hodnotil, zda zpracovaná barevná hmota vyhovuje.

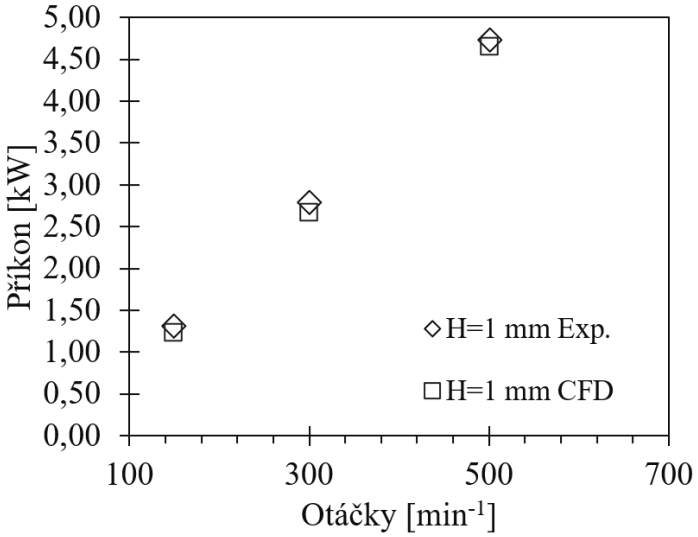
Nejjednodušším řešením tedy je instalovat na jedné hřídeli ekvivalentní počet disků a míchadel. Zároveň bylo třeba vyřešit chlazení hmoty, neboť disipovaný výkon ohříval zpracovávanou látku přibližně o 8 °C na jeden průchod, což by znamenalo dosažení denaturační teploty kolagenu po třech průchodech a znehodnocení zpracovávaného materiálu.

4.2.7 CFD model

Pro hlubší analýzu výsledků se standardně používají CFD modely. Tato analýza byla zaměřena jak na integrální charakteristiky, tak lokální hodnoty rychlostních polí, resp. smykových rychlostí. V běžném CAD-CAM (Solidworks®) nástroji byl vytvořen zjednodušený geometrický model zařízení, který byl předveden do programovacího prostředí CFD simulací ANSYS® verze 18.0, kde byl upraven. Trojrozměrný model byl vyplněn strukturovanou sítí šestistěnnými elementy, viz obr. 4-21. Pro modelování pohybujících se částí systému byl použit přístup Mutiple Reference Frame (MRF), kde byl vyšetřovaný objem rozdělen na oblasti rotor a stator. Vzhledem k malým mezerám (řádově mm) mezi fyzickými stěnami rotoru a statoru, procházela dělící rovina (Interface) mezi modelovými oblastmi rotoru a statoru geometrickým středem mezery. V těchto oblastech byla věnována maximální pozornost kvalitě sítě a jejímu zahuštění s ohledem na vyhodnocované výsledky. Před vlastními systematickými simulacemi byla provedena analýza sítě, tzv. Grid Convergence Index (GCI), která umožnila najít optimální velikost, resp. počet elementů sítě vzhledem k velikosti numerické chyby [Celik, 2008]. Byly zkoumány tři hustoty sítě 1,2; 2,7 a 5,8 milionů elementů. Pro další simulace byla zvolena síť o velikosti 3 milionů elementů. Pro popis fyzikálních, resp. reologických parametrů (funkce viskozity) látky, byl použit mocninový model, s parametry dle tab. 4.4. V celém vyšetřovaném objemu zařízení byl plouživý tok (Re < 30) pro všechny rozsahy operačních parametrů simulace. SIMPLE schéma bylo použito pro iterační výpočet tlaku a rychlostí (rovnice kontinuity a Navier-Stokes rovnice). Výpočtové schéma Second Order Upwind bylo zvoleno pro výpočet hybnosti, tlaků a rychlostí. Výsledná residua výpočtu kontinuity byla pod hodnotami 10^{-7}. Residua rychlostí byla pod těmito hodnotami [Ayas, Skočilas, et al 2018].



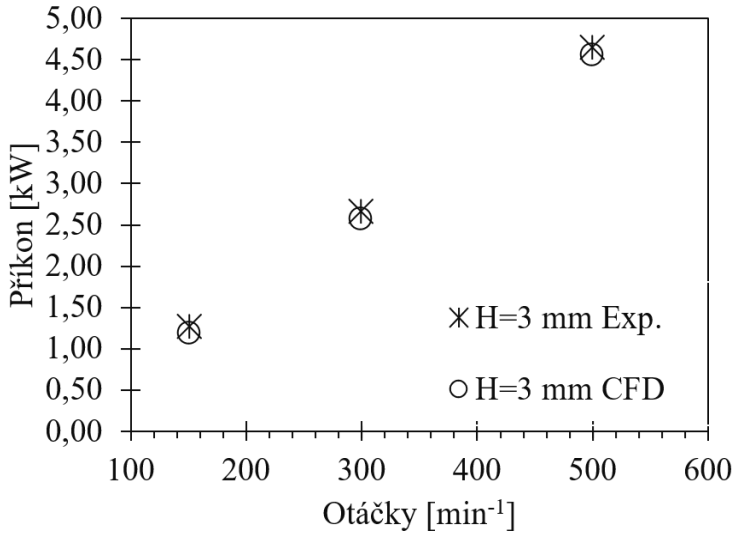
Obr. 4-21 Vyšetřovaná oblast vnitřního objemu zařízení vyplněná strukturovanou sítí, 3 mil. buněk modelu [Ayas, Skočilas, et al 2018].



Obr. 4-22 Porovnání experimentu a CFD simulace pro mezeru 1 mm [Ayas, Skočilas, et al 2018]

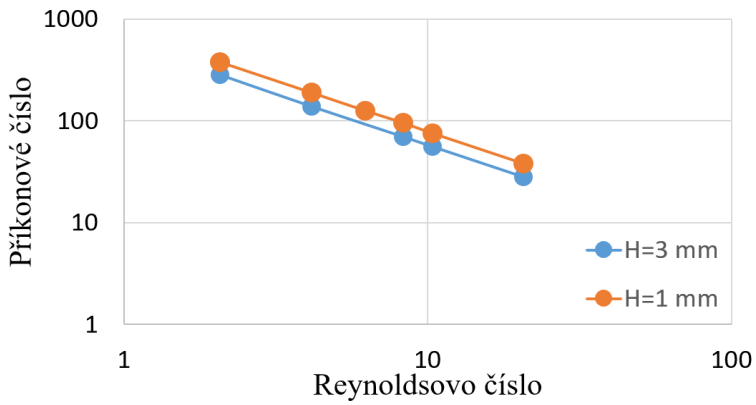
Po dosažení požadované konvergence modelu, byly vyhodnoceny nejprve integrální charakteristiky zařízení z výsledků simulace. Příkon zařízení byl stanoven na základě výpočtu krouticího momentu působícího na rotor zařízení, tedy lopatky obou míchadel a hřídel pro každé nastavené otáčky a velikost mezery. Tyto hodnoty byly porovnány s naměřenými daty. Rozdíl hodnot získaných simulací a experimentem se pohyboval do 10 %. To bylo možné očekávat neboť použitý přístup modelování pohybujících se částí (MRF) predikuje integrální charakteristiky ve velmi dobré shodě s experimenty. Lze tedy konstatovat i vzhledem k velikosti dosažené chyby, že model je vhodný pro návrh geometricky podobného zařízení s ohledem na potřebný výkon a mechanické zatížení jednotlivých částí stroje. Grafické porovnání výsledků experimentu a simulace pro obě velikosti mezery a rozsahy použitých otáček je uvedeno na obr. 4-22 a 4-23. Z těchto výkonů bylo dopočítáno příkonové číslo, dle rovnice (4.6) a porovnání a průběh na otáčkách pro obě velikosti axiální mezery mezi diskem statoru a pracovním elementem rotoru jsou uvedeny na obr. 4-24. Tvar závislosti příkonového čísla na Reynoldsově čísle odpovídá příkonovým charakteristikám rotačních míchadel

v nádobě pro oblast plouživého proudění newtonských kapalin. Z porovnání obr. 4-22 a 4-23 je vidět zanedbatelný vliv velikosti mezery mezi stěnou a míchadlem, vzhledem k dosaženým hodnotám příkonů.



Obr. 4-23 Porovnání experimentu a CFD simulace pro mezeru 3 mm [Ayas, Skočilas, et al 2018]

Pro inženýrský návrh zařízení podobných výše uvedenému, se používají právě příkonové charakteristiky odpovídající použité geometrii, které jsou získány povětšinou experimentálně. V případě plouživého proudění i naše zařízení vyhovuje vztahu (4.5) pro rotační míchadla, kde důležitým parametrem je konstanta A_m.



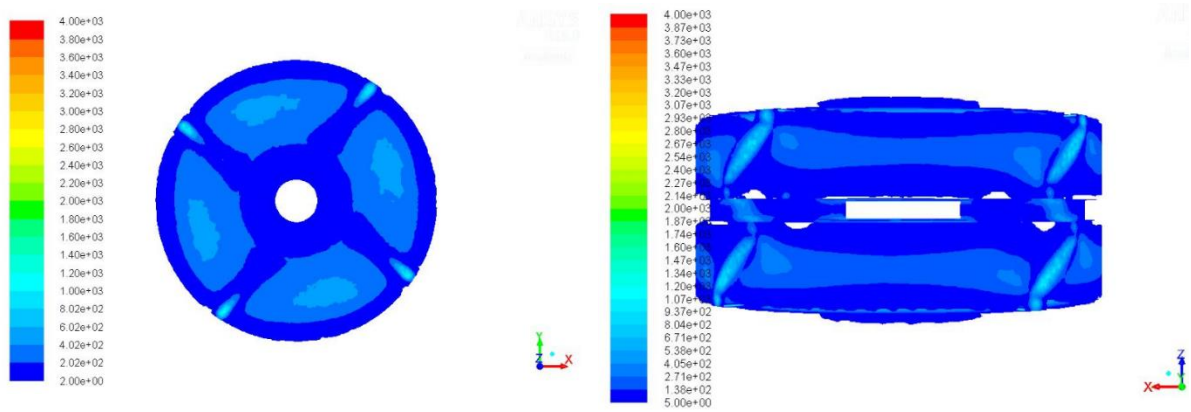
Obr. 4-24 Příkonová charakteristika zařízení z CFD modelu, [Ayas, Skočilas, et al 2018]

Koeficienty k_s a A_m rovnice (4.12) jsou důležitými návrhovými parametry z hlediska stanovení potřebného výkonu pro míchání systému s nenewtonskou látkou. Hodnoty Metznerovy konstanty popisující geometrii experimentálního mísiče, jsou uvedeny v tab. 4.7. Byly získány jak z experimentu, tak numericky. Odchylka střední hodnoty koeficientu z numerické simulace je menší než 6 % v porovnání s experimentálními daty pro všechny otáčky.

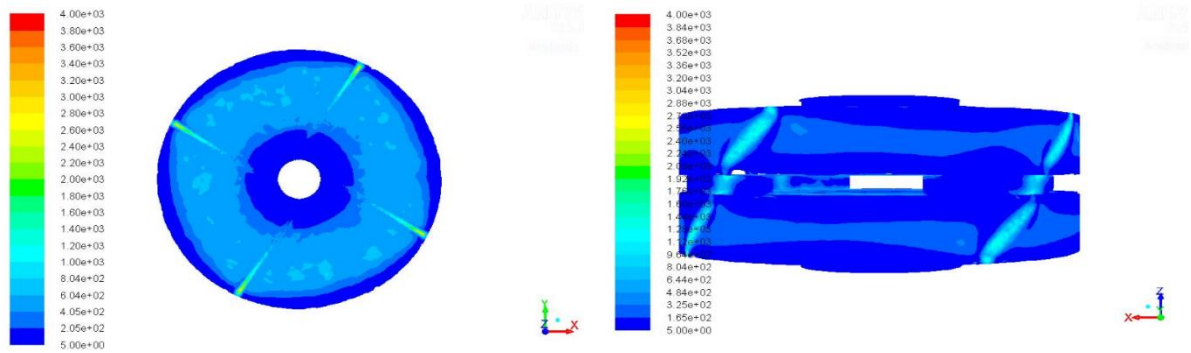
Tab. 4.7 Experimentálně a numericky stanovené hodnoty konstanty k_s pro daný systém a viskoplastickou kapalinu [Ayas, Skočilas, et al 2018]

Otáčky	**[min^{-1}]**	**150**	**300**	**500**	**Průměr**
k_s experiment	[-]	57,0	59,5	61,5	59,3
k_s CFD	[-]	63,0	62,1	63,1	62,7

Predikce CFD modelů, pokud jsou validovány, může posloužit například k analýze tokového pole z hlediska identifikace mrtvých zón s následnou optimalizací geometrického uspořádání vnitřních částí stroje. Nebo je možno výsledky simulací použít ke stanovení nejvíce namáhaných míst systému tam, kde se objevují špičky smykového napětí na stěně. Takovým příkladem mohou být výsledky simulace pro otáčky 300 min^{-1} pro dvě různé mezery mezi statorem a rotorem, viz obr. 4-25 a 4-26.



Obr. 4-25 Kontury smykových napětí v radiální rovině vedené středem mezery mezi statorem a rotorem vlevo, a na vnějších plochách systému vpravo, velikost mezery 3 mm, [Ayas, Skočilas, et al 2019

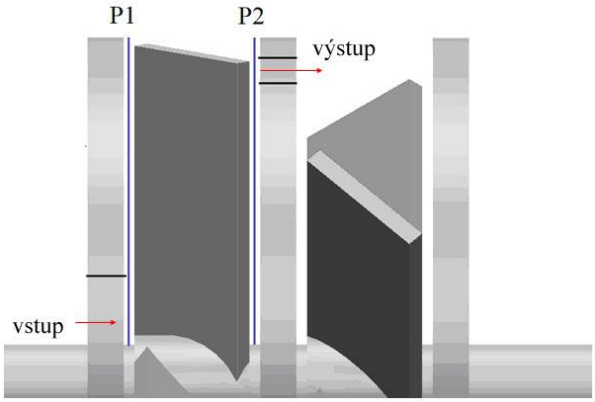


Obr. 4-26 Kontury smykových napětí v radiální rovině vedené středem mezery mezi statorem a rotorem vlevo, a na vnějších plochách systému vpravo, velikost mezery 1 mm, [Ayas, Skočilas, et al 2019]

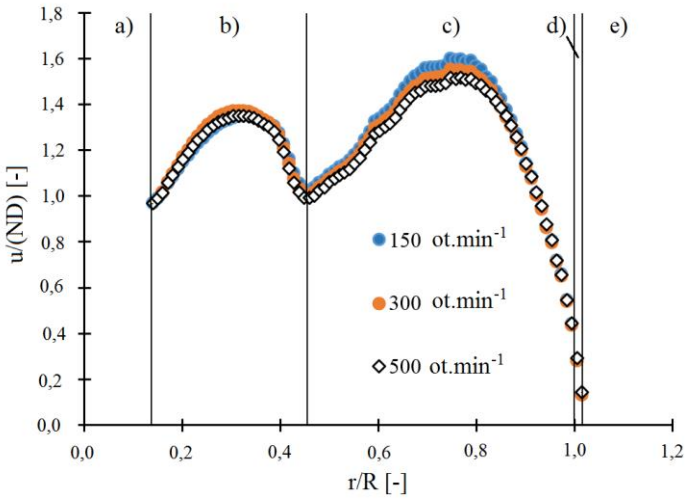
Z obr. 4-25 a 4-26 je zřejmé, že maximální napětí se nacházejí na obvodových hranách lopatek, tam, kde je největší obvodová rychlost. Zde bude docházet k největšímu namáhání a otěru lopatky kapalinou. Navíc jsou maxima smykových napětí v případě mezery mezi statorem a rotorem 1 mm nepatrně vyšší, než pro případ 3 mm.

Zajímavý bude jistě i axiální rychlostní profil a rychlost smykové deformace v radiální rovině v mezeře mezi statorem a rotorem. Pro tyto účely byly při vyhodnocování simulačních dat

vytvořeny dvě roviny u každého míchadla, ze kterých se exportovala data rychlostí a souřadnic, viz obr. 4-27. Následně byl rekonstruován axiální rychlostní profil aritmetickými průměry obvodových rychlostí na příslušném poloměru. Posléze byla tato závislost převedena do bezrozměrného tvaru. Vše bylo provedeno v prostředí MATLAB.

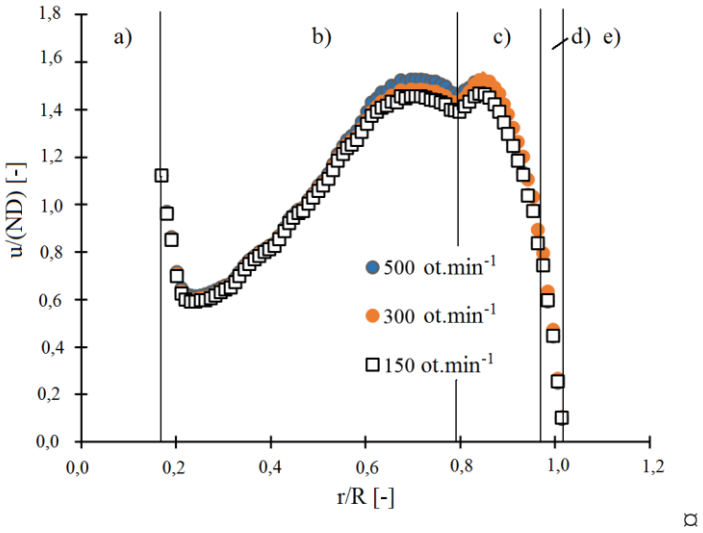


Obr. 4-27 Vyznačené roviny, ve kterých byla provedena analýza rychlostního profilu. [Ayas, Skočilas, et al 2019]



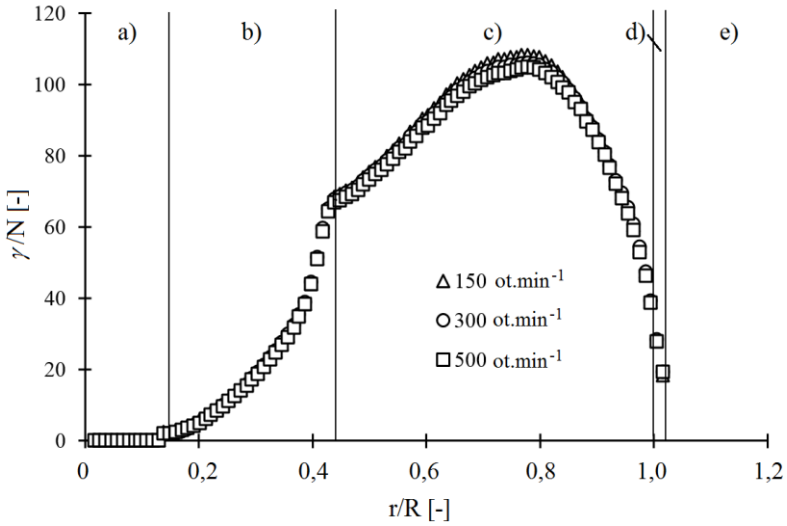
Obr. 4-28 Závislost bezrozměrného axiálního rychlostního profilu na bezrozměrné radiální souřadnici pro tři otáčky rotoru a mezeru 3 mm mezi rotorem a statorem, rovina P1, a) hřídel, b) vstupní otvor v předním disku, b) + c) lopatka míchadla, d) mezera mezi lopatkou a válcovou stěnou zařízení, e) stěna zařízení [Ayas, Skočilas, et al 2019]

Na obr. 4-28 jsou viditelná dvě lokální maxima. Menší z nich je způsobeno vstupem kapaliny v axiálním směru do míchadla, v rozsahu hodnot r/R = 0,2 až 0,4. Naopak efekt výstupních průřezu z oblasti prvního míchadla je zanedbatelný. Bezrozměrný rychlostní profil nezávisí na otáčkách a malé rozdíly mezi profily pro různé otáčky lze přičíst numerické chybě. Maximální axiální rychlost leží přibližně na souřadnici r/R = 0,75.



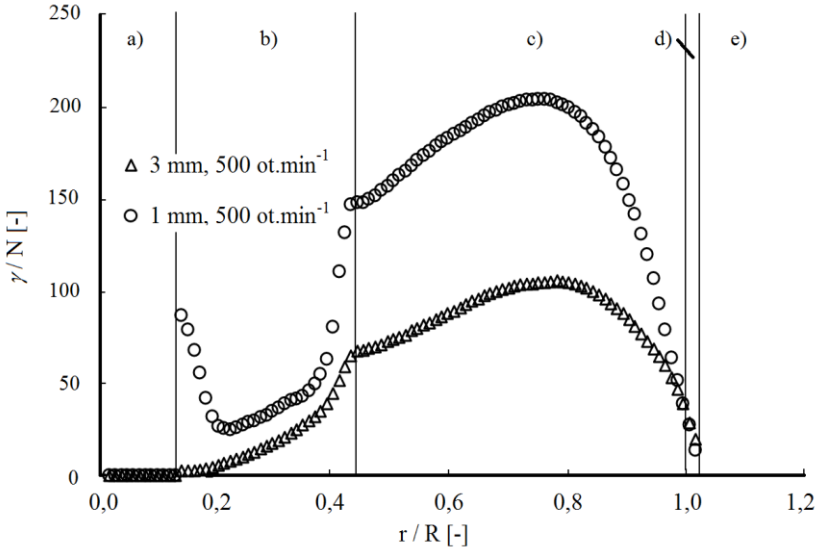
Obr. 4-29 Závislost bezrozměrného axiálního rychlostního profilu na bezrozměrné radiální souřadnici pro tři otáčky rotoru a mezeru 3 mm mezi rotorem a statorem, rovina P2, a) hřídel, b) + c) lopatka míchadla, c) výstupní otvor v zadním disku, d) mezera mezi lopatkou a válcovou stěnou zařízení, e) stěna zařízení [Ayas, Skočilas, et al 2019]

Na obr. 4-29 jsou opět viditelná dvě maxima, ležící blízko sebe. Maximum více vpravo odpovídá umístění nátoku hmoty do druhého míchadla, resp. míchací komory. Lokální minimum axiální rychlosti leží v oblasti výstupu hmoty z druhé míchací komory.



Obr. 4-30 Závislost bezrozměrné rychlosti smykové deformace bezrozměrné radiální souřadnici pro tři otáčky rotoru a mezeru 3 mm mezi rotorem a statorem, rovina P1, a) hřídel, b) vstupní otvor v předním disku, b) + c) lopatka míchadla, d) mezera mezi lopatkou a válcovou stěnou zařízení, e) stěna zařízení [Ayas, Skočilas, et al 2019]

Také zprůměrovaný bezrozměrný profil rychlosti deformace, viz obr. 4-30, byl vytvořen stejným postupem jako axiální rychlosti. Z profilu smykové rychlosti je zřejmé, že v mezeře mezi lopatkou a stěnou převládá plně smykové proudění. Tvar profilu odpovídá získaným profilům rychlostí, včetně oblasti ovlivněné vstupním otvorem do první míchací komory. Při konstantní mezeře mezi rotorem a statorem jsou profily smykových rychlostí pro různé otáčky téměř identické. Rozsah smykových rychlostí CFD modelu, odpovídá platnému rozsahu smykových rychlostí použitého mocninového modelu.



Obr. 4-31 Závislost bezrozměrné rychlosti smykové deformace na bezrozměrné radiální souřadnici pro maximální otáčky rotoru 500 min^{-1} a dvě mezery 1 a 3 mm mezi rotorem a statorem, rovina P1, a) hřídel, b) vstupní otvor v předním disku, b) + c) lopatka míchadla, d) mezera mezi lopatkou a válcovou stěnou zařízení, e) stěna zařízení [Ayas, Skočilas, et al 2019]

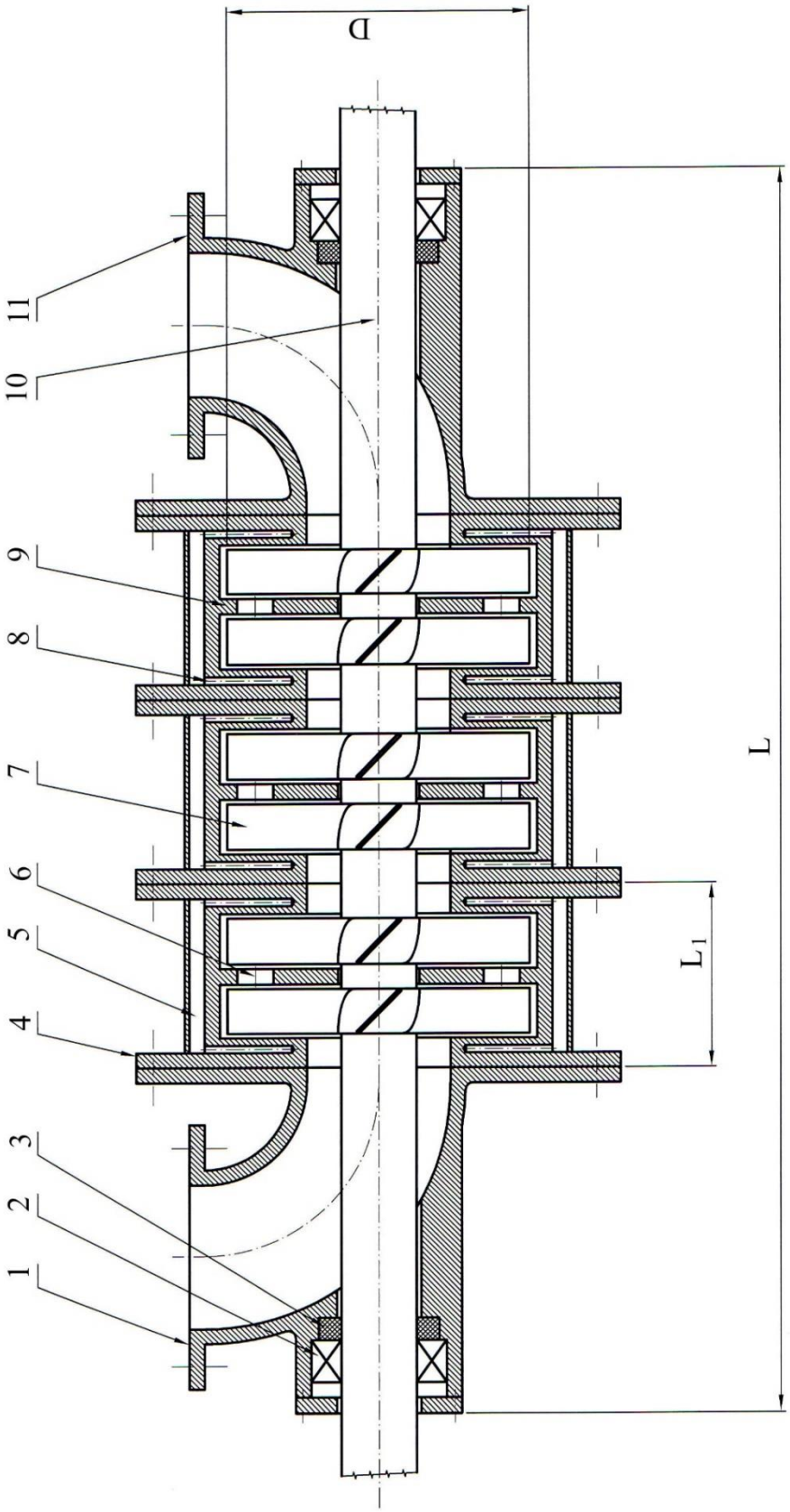
Z obr. 4-31, kde je zobrazeno porovnání dvou profilů bezrozměrných smykových rychlostí, je zřejmý významný vliv mezery mezi rotorem a statorem, kde pro maximální měřené otáčky rotoru 500 min^{-1} jsou rozdíly smykových rychlostí pro mezery 1 a 3 mm v zóně míchání až dvojnásobné. Tomu by ale měly odpovídat dvojnásobné hodnoty Otto-Metznerových konstant, což není pravda, viz tab. 4.7, protože ty jsou závislé více na homogenizaci, než dispergaci, která se odehrává právě v mezeře mezi lopatkou a stěnou.

Z numerické analýzy vyplývají důležité závěry, které by se měly promítnout do optimalizace konstrukčního návrhu zařízení. S ohledem na výsledky experimentů s poloprovozním zařízením a CFD analýzy je nutno upravit stávající koncept zařízení. Nové provozní zařízení musí obsahovat tři za s sebou zapojené experimentální mísiče. CFD analýzou lze stanovit mrtvé zóny, kde nedochází k pohybu zpracovávané hmoty. Tyto zóny je nutné odstranit.

4.2.8 Zjednodušený návrh zařízení

Na obr. 4-32 uvádím basic design nového zařízení. Zařízení je složeno z vyměnitelných modulů. V případě zvýšení nebo snížení požadavku na homogenizaci, je možno moduly přidat nebo odebrat. Jediným prvkem, který nesplňuje zaměnitelnosti, je hřídel. Pro různý počet modulů bude nutno použít hřídele o příslušných délkách. V případě extrémního zvýšení počtu modulů je potřeba pevnostně zkontrolovat hřídel a ložiska. Při zachování velikosti zařízení a otáček, je jediným požadavkem počet za sebou řazených míchacích komor.

Tvar vstupní a výstupní části míchadla je hydrodynamicky upraven. Hydraulické ztráty se sníží, nátok do pracovní zóny bude plynulejší a odstraní se mrtvé (stagnantní) zóny ve vstupní a výstupní části oproti původnímu konceptu. Průměr míchadla je 200 mm a otáčky 500 min^{-1}, mezera mezi lopatkou a pevnou stěnou 3 mm. Každý modul je opatřen duplikátorovým pláštěm z důvodu chlazení zpracovávané hmoty ledovou vodou. Z duplikátoru je chladicí voda rozvedena kanálky do těla rozdělovacího disku mezi párem míchadel. Geometrie, resp. plocha průtočných otvorů mezi pracovními prostory, je zachována ve stejné velikosti, jako u poloprovozního zařízení. Oproti zjednodušenému výkresu na obr. 4.30 jsou lopatky míchadel vůči sobě otočeny o 45°.



Obr. 4-32 Basic design nového zařízení

Legenda: 1 – vstup, 2 – ložisko, 3 – těsnění, 4 – modul zařízení, 5 – duplikátor, 6 – průchod mezi míchacími komorami, 7 – míchadlo, 8 – chladicí kanály, 9 – disk mezi komorami, 10 – hřídel, 11 – výstup, L_1 – délka komory, L – délka zařízení, D – průměr míchadla

5. ZÁVĚR

Moderní výroby potravinářského průmyslu čelí neustále novým výzvám především v oblasti optimalizace technologií a procesů. Bez znalostí strojního inženýra se žádný potravinářský provoz dlouhodobě neobejde a vedle hlavního technologa by součástí pracovního týmu měl být procesní inženýr, který disponuje dostatečnými znalostmi základních procesů, návrhu a provozu zařízení a vazbami mezi nimi.

Návrh nebo optimalizace zařízení pro potravinářský průmysl představuje rozsáhlý problém vzhledem k vlastnostem zpracovávané látky, požadavkům technologie, hygieny, údržby a obsluhy. Hlavním cílem pochopení interakce stroje a zpracovávané látky je popis odezvy látky na vnější zatížení.

Cílem této práce bylo podat ucelený soubor znalostí o problematice zpracování vysokoviskózních látek v potravinářském průmyslu se značným důrazem na vybranou látku, která je představitelem přírodního polymeru – hovězí kolagen. Tyto znalosti a mnohdy i dovednosti vycházejí z dlouholetého výzkumu zaměřeného na popis a pochopení principů chování kolagenní hmoty. Bylo použito, navrženo či modifikováno mnoho přístupů pro ověření zformulovaných hypotéz, počínaje návrhem a realizací vlastního měřicího zařízení, odvozením matematického modelu a jeho algoritmizace, zpracování a vyhodnocení experimentálních dat včetně statistické analýzy, až po použití moderních simulačních nástrojů pro hlubší studium problému. Bylo navrženo poloprovozní zařízení, které sloužilo k ověření hypotéz a postupů, které byly použity pro návrh tohoto zařízení. Experimenty na poloprovozním zařízení a CFD analýza toku látku uvnitř tohoto zařízení posloužily ke zjednodušenému návrhu provozního zařízení.

Konkrétními výstupy jsou

- reologické modely s parametry popisujícími tokové vlastnosti vysoce koncentrované kolagenní hmoty ve formě těsta nebo pasty
- odvození a validace jednoduché inženýrské rovnice pro popis třecích ztrát laminárního toku mocninové kapaliny potrubím nekruhového průřezu
- modely popisující viskoelastické chování kolagenní hmoty
- elektrické a tepelné vlastnosti a jejich souvislost s reologickými vlastnostmi
- modifikace mechanických a strukturálních vlastností kolagenní hmoty elektromagnetickým zářením
- experimentální stanovení výkonových charakteristik navrženého zařízení pro průmyslové zpracování kolagenní hmoty, včetně CFD modelu a jeho validace experimentálními daty
- ukázka způsobu návrhu konkrétního zařízení na základě experimentálních dat a CFD.

V rámci dlouholetého a intenzivního výzkumu chování kolagenní hmoty bylo nelezeno mnoho zajímavých poznatků, které posouvají technická odvětví nejen v potravinářském průmyslu blíže k řešení optimální technologie výroby kolagenní hmoty a návrhu příslušného zařízení.

SEZNAM LITERATURY

ANDERSON, J. C. a C. ERIKSSON. Electrical Properties of Wet Collagen. *Nature* [online]. 1968, **218**(5137), 166-168. DOI: 10.1038/218166a0. ISSN 0028-0836. Dostupné z: http://www.nature.com/articles/218166a0

ARRUDA, Ellen M. a Mary C. BOYCE. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. Journal of the Mechanics and Physics of Solids [online]. 1993, **41**(2), 389-412. DOI: 10.1016/0022-5096(93)90013-6. ISSN 00225096. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022509693900136

AYAS, Mehmet, Jan SKOCILAS a Tomas JIROUT. A practical method for predicting the friction factor of power-law fluids in a rectangular duct. *Chemical Engineering Communications* [online]. 2019, 1-7. DOI: 10.1080/00986445.2018.1557153. ISSN 0098-6445. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00986445.2018.1557153

AYAS, Mehmet, Jan SKOČILAS a Tomáš JIROUT. Agitation of viscoplastic fluid in an in-line mixer. In: *23rd International Congress of Chemical and Process Engineering*. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2018, s. 2.

BAGLEY, E. B. *End Corrections in the Capillary Flow of Polyethylene.* Journal of Applied Physics. 1957, **28**(5), 624-627. DOI: 10.1063/1.1722814. ISSN 0021-8979. Dostupné z: http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1722814

BAIRD, Donald G. *First normal stress difference measurements for polymer melts at high shear rates in a slit-die using hole and exit pressure data.* Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2008, **148**(1-3), 13-23. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2007.04.007. ISSN 03770257. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377025707000997

BARDELMEYER, G. H. Electrical conduction in hydrated collagen. I. Conductivity mechanisms. *Biopolymers* [online]. 1973, **12**(10), 2289-2302. DOI: 10.1002/bip.1973.360121008. ISSN 0006-3525. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/bip.1973.360121008

BARHOŇ, M. *Radial extrusion flow of viscous fluid*. Prague, 1989. MSc Thesis. CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering.

BARNES, H.A. a G.P. ROBERTS. A simple empirical model describing the steady-state shear and extensional viscosities of polymer melts. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [online]. 1992, **44**, 113-126. DOI: 10.1016/0377-0257(92)80047-2. ISSN 03770257. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0377025792800472

BARNES, Howard A., J. F. HUTTON a Kenneth WALTERS. *An introduction to rheology*. New York: Distributors for the U.S. and Canada, Elsevier Science Pub. Co., 1989. Rheology series, 3. ISBN 0-444-87140-3.

BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné také z: https://publi.cz/books/180/Cover.html

BERNSTEIN, B., E. A. KEARSLEY a L. J. ZAPAS. A Study of Stress Relaxation with Finite Strain. *Transactions of the Society of Rheology*[online]. 1963, **7**(1), 391-410. DOI: 10.1122/1.548963. ISSN 0038-0032. Dostupné z: http://sor.scitation.org/doi/10.1122/1.548963

BIRD, R. Byron. *Dynamics of polymeric liquids*. 2nd ed. New York: Wiley, c1987. ISBN 978-0471802457.

BIRD, R. Byron, Warren E. STEWART a Edwin N. LIGHTFOOT. *Transport phenomena*. 2nd, rev. ed. New York: John Wiley, c2007. ISBN 0-470-11539-4.

BISCHOFF, J. E., E. A. ARRUDA a K. GROSH. A Microstructurally Based Orthotropic Hyperelastic Constitutive Law. Journal of Applied Mechanics [online]. 2002, **69**(5). DOI: 10.1115/1.1485754. ISSN 00218936. Dostupné z: http://AppliedMechanics.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1414649

BLAŽEJ, Anton. *Štruktúra a vlastnosti vláknitých bielkovín.* Bratislava: Veda, 1978.

BOGAERDS, Arjen C.B., Wilco M.H. VERBEETEN, Gerrit W.M. PETERS a Frank P.T. BAAIJENS. 3D Viscoelastic analysis of a polymer solution in a complex flow. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* [online]. 1999, **180**(3-4), 413-430. DOI: 10.1016/S0045-7825(99)00176-0. ISSN 00457825. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045782599001760

BOGER, D. V. a Kenneth WALTERS. *Rheological phenomena in focus*. New York: Elsevier, 1993. ISBN 978-0-444-89473-1.

BOYCE, Mary C. a Ellen M. ARRUDA. Constitutive Models of Rubber Elasticity: A Review. Rubber Chemistry and Technology [online]. 2000, **73**(3), 504-523. DOI: 10.5254/1.3547602. ISSN 0035-9475. Dostupné z: http://rubberchemtechnol.org/doi/abs/10.5254/1.3547602

BRITO-DE LA FUENTE, E., L. CHOPLIN a P.A. TANGUY. Mixing With Helical Ribbon Impellers. *Chemical Engineering Research and Design*[online]. 1997, **75**(1), 45-52. DOI: 10.1205/026387697523381. ISSN 02638762. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263876297714928

CAPOBIANCHI, Massimo. *Pressure drop predictions for laminar flows of extended modified power law fluids in rectangular ducts.* International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008, **51**(5-6), 1393-1401. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.11.019. ISSN 00179310. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931007006801

CARREAU, P. J., R. P. CHHABRA a J. CHENG. Effect of rheological properties on power consumption with helical ribbon agitators. *AIChE Journal* [online]. 1993, **39**(9), 1421-1430. DOI: 10.1002/aic.690390902. ISSN 00011541. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690390902

CELIK, I. B., GHIA, U., ROACHE, P. J., FREITAS, C. J., COLEMAN, H., & RAAD, P. E. (2008). Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. Journal of Fluids Engineering, **130**(7), 078001-1-4. DOI: 10.1115/1.2960953. ISSN 00982202.

COGSWELL, F. N. *Converging flow of polymer melts in extrusion dies.* Polymer Engineering and Science. 1972, **12**(1), 64-73. DOI: 10.1002/pen.760120111. ISSN 0032-3888. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/pen.760120111

COLONNA, P., Tayeb, J. and Mercier, C. (1989) Extrusion Cooking of Starch and Starchy Products. In: Mercier, C., Linko, C.P. and Harper, J.M., Eds., Extrusion Cooking, American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, 247-319.

CORVALAN, C.M. a O.H. CAMPANELLA. Volume II, Food Rheology and Texture, Squeezing and Elongation Flow. BARBOSA-CANOVAS, Gustavo V. (Editor) *Food Engineering: Encyclopedia of Life Support Systems*. Paris, France: United Nations Educational, 2006, s. 91-191. ISBN 978-9231039997.

CRESPÍ-LLORENS, D., P. VICENTE a A. VIEDMA. *Generalized Reynolds number and viscosity definitions for non-Newtonian fluid flow in ducts of non-uniform cross-section.* Experimental Thermal and Fluid Science. 2015, **64**, 125-133. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2015.02.005. ISSN 08941777. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089417771500031X

DAVID, J. a P. FILIP. Explicit pressure drop-flow rate relation for laminar axial flow of power-law fluids in concentric annuli. *Journal of Petroleum Science and Engineering* [online]. 1996, **16**(4), 203-208. DOI: 10.1016/S0920-4105(96)00039-3. ISSN 09204105. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0920410596000393

DAVIES, J M, J F HUTTON a K WALTERS. *Theory for normal stresses in slits and capillaries*. Journal of Physics D: Applied Physics. 1973, **6**(18), 2259-2266. DOI: 10.1088/0022-3727/6/18/311. ISSN 00223727. Dostupné z: http://stacks.iop.org/0022-3727/6/i=18/a=311?key=crossref.730e62ce3558d08b76344671561d1dbf

DAVIES, J.T. A physical interpretation of drop sizes in homogenizers and agitated tanks, including the dispersion of viscous oils. *Chemical Engineering Science* [online]. 1987, **42**(7), 1671-1676. DOI: 10.1016/0009-2509(87)80172-0. ISSN 00092509. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0009250987801720

DEALY, John M. Weissenberg and Deborah Numbers – Their Definition and Use. Rheology Bulletin. 2010, 79(2), **14-18**.

DEIBER, Julio A., Marta B. PEIROTTI a Mariel L. OTTONE. *Rheological characterization of edible films made from collagen colloidal particle suspensions.* Food Hydrocolloids. 2011, **25**(5), 1382-1392. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2011.01.002. ISSN 0268005X. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0268005X1100004X

DELPLACE, F. a J.C. LEULIET. *Generalized Reynolds number for the flow of power law fluids in cylindrical ducts of arbitrary cross-section*. The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal. 1995, **56**(2), 33-37. DOI: 10.1016/0923-0467(94)02849-6. ISSN 09230467. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0923046794028496

DOBIÁŠ, Jaroslav a Dušan ČURDA. BALENÍ POTRAVIN. Praha: VŠCHT, 2014. Dostupné také z: https://ukp.vscht.cz/files/uzel/0029134/c0rMSc07vFahIL-kKLEsMw8A.pdf?redirected

DODGE, D. W. a A. B. METZNER. *Turbulent flow of non-newtonian systems.* AIChE Journal. 1959, **5**(2), 189-204. DOI: 10.1002/aic.690050214. ISSN 0001-1541. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690050214

DORFMANN, A. a F.Q. PANCHERI. A constitutive model for the Mullins effect with changes in material symmetry. *International Journal of Non-Linear Mechanics* [online]. 2012, **47**(8), 874-887. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2012.05.004. ISSN 00207462. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020746212000777

DORFMANN, A. a R.W. OGDEN. A constitutive model for the Mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber. International Journal of Solids and Structures [online]. 2004, 41(7), 1855-1878. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2003.11.014. ISSN 00207683. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020768303006504

DUPAL, Libor, František KAMLER, Dalibor TITĚRA, Marcela VOŘECHOVSKÁ a Hana VINŠOVÁ. *Med*. Praha: Sdružení českých spotřebitelů, z.ú., v rámci priority pracovní skupiny Potraviny a spotřebitel při České technologické platformě pro potraviny, 2015. Jak poznáme kvalitu? ISBN 978-80-87719-29-9.

FATHIMA, N. Nishad, M. BAIAS, B. BLUMICH a T. RAMASAMI. Structure and dynamics of water in native and tanned collagen fibers: Effect of crosslinking. *International Journal of Biological Macromolecules* [online]. 2010, **47**(5), 590-596. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2010.08.003. ISSN 01418130. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141813010002515

FRATZL, Peter a Richard WEINKAMER. *Nature's hierarchical materials.* Progress in Materials Science. 2007, **52**(8), 1263-1334. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2007.06.001. ISSN 00796425. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S007964250700045X

FRATZL, Peter. *Collagen: structure and mechanics.* New York: Springer, 2008.

FUNG, Y. C. *Biomechanics: mechanical properties of living tissues*. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1993. ISBN 978-0387979472.

GAUZA, Marlena a Leszek KUBISZ. Effect of water content on electrical conductivity of fish skin collagen. *Journal of Non-Crystalline Solids* [online]. 2011, **357**(2), 686-690. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.07.032. ISSN 00223093. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022309310004370

GIBSON, Lorna J. a Michael F. ASHBY. *Cellular Solids*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. ISBN 9781139878326.

GRAHAM, Richard S. a Tom C.B. MCLEISH. Emerging applications for models of molecular rheology. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [online]. 2008, **150**(1), 11-18. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2007.09.004. ISSN 03770257. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377025707002054

GRANT, R.A., R.W. COX a C.M. KENT. The Effects of Irradiation with High Energy Electrons on the Structure and Reactivity of Native and Cross-Linked Collagen Fibres. *Journal of Cell Science*. 1970, **7**, 387-405.

HARTNETT, J. P., E. Y. KWACK a B. K. RAO. *Hydrodynamic Behavior of Non-Newtonian Fluids in a Square Duct.* Journal of Rheology. 1986, **30**(4), S45-S59. DOI: 10.1122/1.549904. ISSN 0148-6055. Dostupné z: http://sor.scitation.org/doi/10.1122/1.549904

HARTNETT, James P. a Milivoje KOSTIC. *Heat transfer to a viscoelastic fluid in laminar flow through a rectangular channel.* International Journal of Heat and Mass Transfer. 1985, **28**(6), 1147-1155. DOI: 10.1016/0017-9310(85)90122-X. ISSN 00179310. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/001793108590122X

HOLZAPFEL, Gerhard A. Nonlinear solid mechanics: a continuum approach for engineering. New York: Wiley, c2000. ISBN 978-0-471-82319-3.

CHADIMA, Ivan. *Hygienická úskalí potravinářských zařízení a výrobních linek* [online]. Verlag Dashöfer, 2018, 22.5.2018, str. 6. Dostupné z: https://www.potravinyinfo.cz/33/hygienicka-uskali-potravinarskych-zarizeni-a-vyrobnich-linek-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EtI668NLi3Lv1uIo64olodj2ZspOsA8wwA/?query=Ivan%20Chadima&serp=1

CHALOUPKOVÁ, Kateřina a Martin ZATLOUKAL. Theoretical and experimental analysis of the die drool phenomenon for metallocene LLDPE. *Polymer Engineering & Science* [online]. 2007, **47**(6), 871-881. DOI: 10.1002/pen.20771. ISSN 00323888. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/pen.20771

CHHABRA, R. P a J. F RICHARDSON. Non-Newtonian flow in the process industries: fundamentals and engineering applications. Boston, MA: Butterworth-Heinemann, 1999. ISBN 978-0-7506-3770-1.

KAVÁLEK, Michal, Vladimír PLACHÝ, Boris HUČKO, Václav DVOŘÁČEK a Lenka ŠTĚRBOVÁ. *Efektivní postupy extruze obilovin a olejnin*. Praha: [Výzkumný ústav rostlinné výroby], 2018. ISBN 978-80-7427-270-7.

KAYE, A. Non-Newtonian flow in incompressible fluids. *College of Aeronautics Cranfield*. Cranford, UK, 1962, (134), 1-20.

KOSTIC, M. a J.P. HARTNETT. *Predicting turbulent friction factors of non-newtonian fluids in noncircular ducts.* International Communications in Heat and Mass Transfer. 1984, **11**(4), 345-352. DOI: 10.1016/0735-1933(84)90062-9. ISSN 07351933. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0735193384900629

KOZICKI, W., C.H. CHOU a C. TIU. *Non-Newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape.* Chemical Engineering Science. 1966, **21**(8), 665-679. DOI: 10.1016/0009-2509(66)80016-7. ISSN 00092509. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0009250966800167

KRÁTKÝ, Lukáš, Jiří MORAVEC a Tomáš JIROUT. *Návrh hnětače pro přípravu kolagenní hmoty v kontinuálním režimu*. ČVUT v Praze, Fakulta Strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky. Praha, 2014.

KUMAR, Vivek A., Jeffrey M. CAVES, Carolyn A. HALLER, Erbin DAI, Liying LIU, Stephanie GRAINGER a Elliot L. CHAIKOF. *Acellular vascular grafts generated from collagen and elastin analogs.* Acta Biomaterialia. 2013, **9**(9), 8067-8074. DOI: 10.1016/j.actbio.2013.05.024. ISSN 17427061. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1742706113002730

KURTZ, S.J. Continuous squeeze flow missing process. USA. US005749653A. Uděleno 1998. Zapsáno 12.5.1998.

KYSELA, Bohuš, Jan SKOČILAS, Rudolf ŽITNÝ, Jaromír ŠTANCL, Milan HOUŠKA a Aleš LANDFELD. Simulation of collagen solution flow in rectangular capillary. In: DANČOVÁ, P. EPJ Web of conferences, Experimental fluid mechanics 2016 (EFM16). 2017, s. 1-4.

LAI, W. Michael, David RUBIN a Erhard KREMPL. *Introduction to continuum mechanics*. 4th ed. Boston: Butterworth-Heinemann/Elsevier, 2010. ISBN 978-0750685603.

LANDFELD Aleš., Milan HOUŠKA, Jan SKOČILAS, Rudolf ŽITNÝ, Pavla NOVOTNÁ, Jaromír ŠTANCL, Martin DOSTÁL, David CHVÁTIL, The Effect of Irradiation on Rheological and Electrical Properties of Collagen Matter, Applied Rheology, 26 (4), 2016, 1-7, DOI: 10.3933/ApplRheol-26-43775

LANDFELD, Aleš, Rudolf ŽITNÝ, Jan SKOČILAS, Jaromír ŠTANCL, Martin DOSTÁL a Milan HOUŠKA. *Squeezing flow of collagen solution – Mathematical model of shear and elastic behavior* [online]. In: 2015. DOI: 10.1063/1.4918894. Dostupné z: http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4918894

LARSON, R. G. A Constitutive Equation for Polymer Melts Based on Partially Extending Strand Convection. *Journal of Rheology* [online]. 1984, **28**(5), 545-571. DOI: 10.1122/1.549761. ISSN 0148-6055. Dostupné z: http://sor.scitation.org/doi/10.1122/1.549761

LARSON, R. G., S. A. KHAN a V. R. RAJU. Relaxation of Stress and Birefringence in Polymers of High Molecular Weight. *Journal of Rheology* [online]. 1988, **32**(2), 145-161. DOI: 10.1122/1.549965. ISSN 0148-6055. Dostupné z: http://sor.scitation.org/doi/10.1122/1.549965

LARSON, Ronald G. *Constitutive equations for polymer melts and solutions*. Boston: Butterworths, c1988. ISBN 978-0-409-90119-1.

LAUN, H.M., M. RADY a O. HASSAGER. Analytical solutions for squeeze flow with partial wall slip. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*[online]. 1999, **81**(1-2), 1-15. DOI: 10.1016/S0377-0257(98)00083-4. ISSN 03770257. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377025798000834

LEFEBVRE, Jacques. An outline of the non-linear viscoelastic behaviour of wheat flour dough in shear. *Rheologica Acta* [online]. 2006, **45**(4), 525-538. DOI: 10.1007/s00397-006-0093-3. ISSN 0035-4511. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00397-006-0093-3

LELIEVELD, H. L. M., J. T. HOLAH a Donald H. NAPPER, ed. Hygiene in food processing: principles and practice. 2nd ed. Oxford: Woodhead, 2014. Woodhead Publishing series in food science, technology and nutrition. ISBN 9780857094292.

LEONOV, A. I. a A. N. PROKUNIN. *Nonlinear Phenomena in Flows of Viscoelastic Polymer Fluids* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994. ISBN 978-94-010-4548-3.

LEONOV, A. I. Nonequilibrium thermodynamics and rheology of viscoelastic polymer media. *Rheologica Acta* [online]. 1976, **15**(2), 85-98. DOI: 10.1007/BF01517499. ISSN 0035-4511. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/BF01517499

LEWICKI, Piotr P. Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of Food Engineering* [online]. 2004, **61**(4), 483-495. DOI: 10.1016/S0260-8774(03)00219-X. ISSN 02608774. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S026087740300219X

LI, Li, "Dielectric properties of aged polymers and nanocomposites" (2011). *Graduate Theses and Dissertations*. 12128. https://lib.dr.iastate.edu/etd/12128

LIN, Kaili, Dawei ZHANG, Maria Helena MACEDO, Wenguo CUI, Bruno SARMENTO a Guofang SHEN. Advanced Collagen-Based Biomaterials for Regenerative Biomedicine. *Advanced Functional Materials*[online]. 2019, **29**(3) . DOI: 10.1002/adfm.201804943. ISSN 1616301X.

MACOSKO, Christopher W. *Rheology: principles, measurements, and applications*. New York: VCH, c1994. ISBN 1-56081-579-5.

MARIANIOVÁ, D. a L. LAPČÍK. Electrical conductivity measurements of hyaluronic acid and collagen. *Colloid & Polymer Science* [online]. 1993, **271**(2), 143-147. DOI: 10.1007/BF00651816. ISSN 0303-402X. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/BF00651816

MARZEC, E. a K. PIETRUCHA. The effect of different methods of cross-linking of collagen on its dielectric properties. *Biophysical Chemistry* [online]. 2008, **132**(2-3), 89-96. DOI: 10.1016/j.bpc.2007.10.012. ISSN 03014622. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301462207002554

MCLEISH, Tom CB. Polymer architecture influence on rheology. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* [online]. 1997, **2**(6), 678-682. DOI: 10.1016/S1359-0286(97)80009-5. ISSN 13590286. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359028697800095

MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Karel BRADA. Hydraulické stroje: konstrukce a provoz. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02657-4.

METZNER, A. B. a J. C. REED. Flow of non-newtonian fluids—correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions. *AIChE Journal* [online]. 1955, **1**(4), 434-440. DOI: 10.1002/aic.690010409. ISSN 0001-1541. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690010409

MEZGER, Thomas. Applied rheology: with Joe Flow on rheology road. 5st edition. Graz: Anton Paar, 2015. ISBN 978-3-9504016-0-8.

MEZGER, Thomas. *The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers*. 4th edition. Hannover: Vincentz Network, 2014. European coatings tech files. ISBN 978-3866308428.

MIGLER, K. B., Y. SON, F. QIAO a K. FLYNN. Extensional deformation, cohesive failure, and boundary conditions during sharkskin melt fracture. *Journal of Rheology* [online]. 2002, **46**(2), 383-400. DOI: 10.1122/1.1445186. ISSN 0148-6055. Dostupné z: http://sor.scitation.org/doi/10.1122/1.1445186

MILLER, Chester. *Predicting Non-Newtonian Flow Behavior in Ducts of Unusual Cross Section.* Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. 1972, **11**(4), 524-528. DOI: 10.1021/i160044a015. ISSN 0196-4313. Dostupné z: http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/i160044a015

MIRSHAHIDI, Saeid. Banbury-rotor: grabcad.com. Grabcad.com [online]. Dostupné z: https://grabcad.com/library/6-wing-banbury-rotor, 2011

MITSUISHI, Nobuo a Yoshiki AOYAGI. *Non-Newtonian flow in non-circular ducts.* Chemical Engineering Science. 1969, **24**(2), 309-319. DOI: 10.1016/0009-2509(69)80039-4. ISSN 00092509. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0009250969800394

MUSCALU, Gheorghe, Gheorghe VOICU a Adriana ISTUDOR. BREAD DOUGH KNEADING PROCESS OPTIMIZATION IN INDUSTRIAL ENVIRONMENT, USING A DEVICE FOR DOUGH CONSISTENCY CONTROL. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2017, **79**(3), 225-236. ISSN 1454-2358.

MUZYCHKA, Y. S. a J. EDGE. *Laminar Non-Newtonian Fluid Flow in Noncircular Ducts and Microchannels.* Journal of Fluids Engineering. 2008, **130**(11). DOI: 10.1115/1.2979005. ISSN 00982202. Dostupné z: http://FluidsEngineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1478190

NEBESÁŘOVÁ, Jana. *Výsledky měření struktury kolagenu na elektronovém mikroskopu: Součást průběžné zprávy GAČR, Houška, VUPP*. Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, 2016.

NEMAT-NASSER, S. Mechanics today. New York: Pergamon Press, 1981. ISBN 0-08-017246-6.

OLDROYD, J. G. On the formulation of rheological equations of state. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* [online]. 1950, **200**(1063), 523-541. DOI: 10.1098/rspa.1950.0035. ISSN 2053-9169. Dostupné z: http://www.royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1950.0035

PARK, Simsoo a Dong-Ryul LEE. *Experimental and numerical investigations of pressure drop in a rectangular duct with modified power law fluids.* Heat and Mass Transfer. 2003, **39**(8-9), 645-655. DOI: 10.1007/s00231-003-0445-9. ISSN 0947-7411. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s00231-003-0445-9

PAUL, Edward L., Victor A. ATIEMO-OBENG a Suzanne M. KRESTA, ed. Handbook of Industrial Mixing. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2003. ISBN 0471269190.

PHAN-THIEN, N. A Nonlinear Network Viscoelastic Model. *Journal of Rheology* [online]. 1978, **22**(3), 259-283. DOI: 10.1122/1.549481. ISSN 0148-6055. Dostupné z: http://sor.scitation.org/doi/10.1122/1.549481

PHAN-THIEN, Nhan a Mohsen SAFARI-ARDI. Linear viscoelastic properties of flour–water doughs at different water concentrations. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [online]. 1998, **74**(1-3), 137-150. DOI: 10.1016/S0377-0257(97)00071-2. ISSN 03770257. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377025797000712

PHAN-THIEN, Nhan. *Understanding Viscoelasticity* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. Graduate Texts in Physics. ISBN 978-3-642-32957-9.

PŘIDAL, Jan. *Reologie kolagenové hmoty k tažení umělých střev*. Praha, 1988. Kandidátská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.

RIEGER, F. a J. ŠESTÁK. Creeping flow of Newtonian fluids in curved rectangular channels. Applied Scientific Research. 1973, **28**(1), 89-106. DOI: 10.1007/BF00413059. ISSN 0003-6994. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/BF00413059

RIEGER, František a Václav NOVÁK. Power consumption of agitators in highly viscous non-newtonian liquids. *Trans. Inst. Chem. Eng.Transactions of the Institution of Chemical Engineers, London*. 1973, **51**, 105-p. 105.

ROLLHAUSER, H. *The tensile strength of human skin*, Gegenbaurs Morph Jahrb, Lipsko, Vol. **90**, pp. 249-261.

SANTOS, FRANCISCO K.G., ANTONIO N. DANTAS FILHO, RICARDO H.L. LEITE, EDNA M.M. AROUCHA, ANDARAIR G. SANTOS a THIAGO A. OLIVEIRA. Rheological and some physicochemical characteristics of selected floral honeys from plants of caatinga. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* [online]. 2014, **86**(2), 981-994. DOI: 10.1590/0001-3765201420130064. ISSN 0001-3765. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652014000200981&lng=en&tlng=en

SAVOIRE, Raphaëlle, Jean-Louis LANOISELLÉ a Eugène VOROBIEV. Mechanical Continuous Oil Expression from Oilseeds: A Review. *Food and Bioprocess Technology* [online]. 2013, **6**(1), 1-16. DOI: 10.1007/s11947-012-0947-x. ISSN 1935-5130. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11947-012-0947-x

SHOULDERS, Matthew D. a Ronald T. RAINES. *Collagen Structure and Stability. Annual Review of Biochemistry*. 2009, **78**(1), 929-958. DOI: 10.1146/annurev.biochem.77.032207.120833. ISSN 0066-4154. Dostupné z: http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.biochem.77.032207.120833

SHRIVASTAV, B.D., R. BARDE, A. MISHRA a S. PHADAKE. Frequency and Temperature Dependence of Dielectric Properties of Fish Scales Tissues. *Research Journal of Physical Sciences*. 2013, **1**(6), 24-29. ISSN 2320–4796.

SCHMIDT, M. M.; R. C. P. DORNELLES; R. O. MELLO; E. H. KUBOTA; M. A. MAZUTTI; A. P. KEMPKA a I. M. DEMIATE. Collagen extraxtion process. International Food Research Journal, 2016, **23**(3), 913-922. Dostupné z: http://www.ifrj.upm.edu.my/23%20(03)%202016/(1).pdf

SILVER, Frederick H. *Mechanosensing and Mechanochemical Transduction in Extracellular Matrix*. Springer US, 2007. ISBN 978-0-387-25631-3.

SILVER, Frederick H., Gino BRADICA a Alfred TRIA. *Do changes in the mechanical properties of articular cartilage promote catabolic destruction of cartilage and osteoarthritis?* Matrix Biology. 2004, **23**(7), 467-476. DOI: 10.1016/j.matbio.2004.08.003. ISSN 0945053X. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0945053X04001027

SINGH, R. Paul a Dennis R. HELDMAN. *Introduction to food engineering*. 5th ed. Amsterdam: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-398530-9.

SKOČILAS, Jan, Rudolf ŽITNÝ a Jiří ŠESTÁK. Starch Foam Expansion in a Closed Mold. *Food and Bioprocess Technology* [online]. 2010, **3**(4), 615-619. DOI: 10.1007/s11947-010-0348-y. ISSN 1935-5130. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/s11947-010-0348-y

SKOČILAS, Jan, Rudolf ŽITNÝ, Jaromír ŠTANCL, Martin DOSTÁL, Aleš LANDFELD a Milan HOUŠKA. Rheological Properties of Collagen Matter Predicted Using an Extrusion Rheometer. *Journal of Texture Studies* [online]. 2016, **47**(6), 514-522. DOI: 10.1111/jtxs.12194. ISSN 00224901. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1111/jtxs.12194

SKOČILAS, Jan, Rudolf ŽITNÝ, Jaromír ŠTANCL, Stanislav SOLNAŘ, Aleš LANDFELD a Milan HOUŠKA. *Flow of bovine collagen in rectangular slit* [online]. In: AIP Conference Proceedings 1843(1). 2017. DOI: 10.1063/1.4982995. Dostupné z: http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4982995

SKOČILAS, Jan, Stanislav SOLNAŘ, Aleš LANDFELD, Rudolf ŽITNÝ, Jaromír ŠTANCL a Milan HOUŠKA. Design of extrusion rheometer for viscoelastic materials. In: *The XVIIth International Congress on Rheology (ICR2016)*. Japan: The Society of Rheology, 2016, s. 2.

SLUKOVÁ, Marcela, Levková J., Příhoda J..: Vliv procesů hnětení těsta na strukturu obilných bílkovin. Pekař cukrář 7, str. 52-54 (2014). ISSN 1213-2403.

SMEJTKOVÁ, Andrea a Jaroslav DOBIÁŠ. *Obaly a obalová technika*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2004. ISBN isbn80-213-1315-3.

SOBOTKA, Zdeněk. *Reologie hmot a konstrukcí*. Praha: Academia, 1981.
STEFFE, James Freeman. *Rheological methods in food process engineering*. 2nd ed. East Lansing, MI: Freeman Press, 1996. ISBN 0-9632036-1-4.

ŠESTÁK, Jiří, Rudolf ŽITNÝ a J. BUKOVSKÝ. A comparison of methods for rapid calculation of frictional pressure drop and heat transfer coefficient for flow of non-Newtonian fluids in ducts with non-circular cross-sections. In: *Proceedings of the International Conference on Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology for the Process Industries*. 1999, s. 1-7.

ŠTANCL, Jaromír, Jan SKOČILAS, Aleš LANDFELD, Rudolf ŽITNÝ a Milan HOUŠKA. ELECTRICAL AND THERMODYNAMIC PROPERTIES OF A COLLAGEN SOLUTION. *Acta Polytechnica* [online]. 2017, **57**(3), 229-234. DOI: 10.14311/AP.2017.57.0229. ISSN 1805-2363. Dostupné z: https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/4068

TANNER, Roger I. *Engineering rheology*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2000. ISBN 978-0198564737.

TANNER, Roger I., Fuzhong QI a Shao-Cong DAI. Bread dough rheology and recoil. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [online]. 2008, **148**(1-3), 33-40. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2007.04.006. ISSN 03770257. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377025707000985

THIEN, Nhan Phan a Roger I. TANNER. A new constitutive equation derived from network theory. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [online]. 1977, **2**(4), 353-365. DOI: 10.1016/0377-0257(77)80021-9. ISSN 03770257. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0377025777800219

TIAN, Zhenhua, Lian DUAN, Lei WU, Lirui SHEN a Guoying LI. Rheological properties of glutaraldehyde-crosslinked collagen solutions analyzed quantitatively using mechanical models. *Materials Science and Engineering: C* [online]. 2016, **63**, 10-17. DOI: 10.1016/j.msec.2016.02.047. ISSN 09284931. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0928493116301448

TOMASELLI, V. P. a M. H. SHAMOS. Electrical properties of hydrated collagen. I. Dielectric properties. *Biopolymers* [online]. 1973, **12**(2), 353-366. DOI: 10.1002/bip.1973.360120212. ISSN 0006-3525. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/bip.1973.360120212

TRELOAR, L. R. G. *The physics of rubber elasticity: by L.R.G. Treloar*. 3rd ed. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 0198570279.

ULBRECHT, Jaromír a Pavel MITSCHKA. Chemické inženýrství nenewtonských kapalin. Praha: ČSAV, 1965

VASILIJEVIČ, T.P., Z.O. IVANOVIČ, T.I. PAVLOVIČ a G.V. STĚPANOVIČ. Zařízení ke kontinuálnímu mísení těsta. 258412. Zapsáno 19.9.1983.

VERDIER, Claude, Jocelyn ETIENNE, Alain DUPERRAY a Luigi PREZIOSI. Review: Rheological properties of biological materials. *Comptes Rendus Physique* [online]. 2009, **10**(8), 790-811. DOI: 10.1016/j.crhy.2009.10.003. ISSN 16310705. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1631070509001492

VOJÁČEK, Antoník. Principy průmyslových čerpadel. Automatizace.hw.cz [online]. 18. Leden 2011. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-1dil-zubova-cerpadla

WEISBECKER, Hannah, David M. PIERCE, Peter REGITNIG a Gerhard A. HOLZAPFEL. Layer-specific damage experiments and modeling of human thoracic and abdominal aortas with non-atherosclerotic intimal thickening. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2012, **12**, 93-106. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2012.03.012. ISSN 17516161. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616112000926

WHEELER, John A. a Eugene H. WISSLER. *The friction factor–Reynolds number relation for the steady flow of pseudoplastic fluids through rectangular ducts.* Part I. Theory. AIChE Journal. 1965, **11**(2), 207-212. DOI: 10.1002/aic.690110208. ISSN 0001-1541. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690110208

WHITE, Frank M. *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, New York, 1973.

WHITE, J. L. a A. B. METZNER. Development of constitutive equations for polymeric melts and solutions. *Journal of Applied Polymer Science*[online]. **7**(5), 1867-1889. DOI: 10.1002/app.1963.070070524. ISSN 00218995. Dostupné z: http://doi.wiley.com/10.1002/app.1963.070070524

WHITE, James L. a Akio KONDO. Flow patterns in polyethylene and polystyrene melts during extrusion through a die entry region: measurement and interpretation. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [online]. 1977, **3**(1), 41-64. DOI: 10.1016/0377-0257(77)80011-6. ISSN 03770257. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0377025777800116

YANG, Huan, Lian DUAN, Qian LI, Zhenhua TIAN a Guoying LI. Experimental and modeling investigation on the rheological behavior of collagen solution as a function of acetic acid concentration. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2018, **77**, 125-134. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2017.09.003. ISSN 17516161. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751616117303843

ZATLOUKAL, Martin. Differential viscoelastic constitutive equations for polymer melts in steady shear and elongational flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [online]. 2003, **113**(2-3), 209-227. DOI: 10.1016/S0377-0257(03)00112-5. ISSN 03770257. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377025703001125

ZHANG, Zhongkai, Li GUOYING a Shi BI. Physicochemical properties of collagen, gelatin and collagen hydrolysate derived from bovine limed split wastes. *Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists*. 2006, **90**, 23-28.

ŽITNÝ, R., A. LANDFELD, J. SKOČILAS, J. STANCL, V. FLEGL, M. ZACHARIÁŠOVÁ, M. JÍRŮ a M. HOUŠKA. Hydraulic characteristic of collagen. *Czech Journal of Food Sciences* [online]. 2016, **33**(No. 5), 479-485. DOI: 10.17221/62/2015-CJFS. ISSN 12121800. Dostupné z: http://www.agriculturejournals.cz/web/cjfs.htm?volume=33&firstPage=479&type=publishedArticle

ŽITNÝ, Rudolf, Aleš LANDFELD, Jan SKOČILAS, Jaromír ŠTANCL, Vlastimil FLEGL a Milan HOUŠKA. UNSTEADY FLOW OF THIXOTROPIC COLLAGEN SUBSTANCE IN PIPES. *Acta Polytechnica* [online]. 2015, **55**(5), 352-358. DOI: 10.14311/AP.2015.55.0352. ISSN 1805-2363. Dostupné z: https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/2813

Internetové odkazy

ALBERTINA - APOLLO GP Lineární plnicí zařízení [online]. [cit. 2019-01-28]. Dostupné z: http://www.albertina-machinery.com/

Anton Paar: Amplitude sweep. *Anton Paar* [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://wiki.anton-paar.com/en/amplitude-sweeps/

Armat, spol. s.r.o. *SPECIFIKACE NEREZOVÝCH MATERIÁLŮ* [online]. [cit. 2019-01-25]. Dostupné z: https://www.armat.cz/pdf/specifikace-nerezovych-oceli-chemicke-slozeni.pdf

Artos s.r.o., Hnětač těsta MARATON 145, [online]. [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: http://www.artos.cz/pekarske-stroje-zarizeni/hnetaci-slehaci-stroje-a-preklapece/hnetac-testa-maraton-145/

Continental Steel & Tube Company, *Nickel & High Temp Alloys.* [online]. Fort Lauderdale, FL, 33303: Continental Steel & Tube Company. [online]. [cit. 2019-02-3]. Dostupné z: http://continentalsteel.com/nickel-alloys/

De Mari, Extrusion Dies and Equipment for the Food Industry [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://demaripastadies.com/

EHEDG - *European Hygienic Engineering and Design Group* [online] [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://www.ehedg.org/

MZe - *Informační centrum bezpečnosti potravin*. Ministerstvo zemědělství [online]. [cit. 2019-03-15] Dostupné z: https://www.bezpecnostpotravin.cz/

Max Mixer CO., Lmt.,1, Hnětač s Z-míchadly http://cz.maxmixermachine.com/sigma-mixer/sigma-blade-mixer/double-z-blade-mixer-machine.html [online]. [cit. 2019-03-23].

Max Mixer CO., Lmt., 2, Horizontální lopatkový mixer http://cz.maxmixermachine.com/industrial-mixer/ribbon-blender/ribbon-blender-mixer-machine.html [online]. [cit. 2019-03-23].

Nakakin NC, Lobe čerpadla: ROTARY PISTON PUMPS SC SERIES. Nakakin [online]. [cit. 2019-03-23]. Dostupné z: https://www.nakakin.eu/en/products/series/sc-series

Sanitary Stainless Steel Tri Clamp Fittings, Clamp Pipe Couplings For Food Industry, ISO 2852 [online]. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: http://www.sanitarystainlesssteelvalves.com

Special Metals Company, *Nickel Alloys*. http://www.specialmetalswiggin.co.uk [online]. Hereford: Special Metals & PCC company. [online]. [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://www.specialmetalswiggin.co.uk/products/by-alloy

Topos a.s., Horizontální hnětač TYČOVÝ T-1164. [online]. [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: http://www.topos.eu/horizontalni-hnetace/horizontalni-hnetac-tycovy-t-1164

SEZNAM OBRÁZKŮ

Číslo	Název
1-1	Technologie výroby kolagenových střev
2-1	Závislost viskozity medu na teplotě. Med z různých druhů květin – původ Brazílie
2-2	Rozdělení látek na základě hodnot Debořina čísla, tzv. Pipkinův diagram
2-3	Smykové proudění mezi dvěma deskami
2-4	Typické chování viskózní nenewtonské kapaliny (s vnitřní strukturou - polymer, biopolymer), logaritmické měřítko
2-5	Základní modely čistě viskózních kapalin. 1 – Newtonská, 2 – Dilatantní, 3 – Pseudo-plastická, 4 – Binghamská, 5 – Herschel-Bulkley (Sisko)
2-6	Projevy viskoelastického chování látky
2-7	Modely lineární viskoelasticity, a) Maxwell, b) Kelvin-Voigt
2-8	Záznam naměřených dat pro kapalinu s Maxwellovým modelem chování
2-9	Oscilační test s použitím techniky zvětšující se amplitudy, závislost modulů na smykovém napětí, mez toku a bod toku
3-1	Struktura kolagenového vlákna
3-2	Snímek pořízený elektronovým mikroskopem, a) měřítko 2 μm, b) detail měřítko 500 nm, vlákna hovězího kolagenu
3-3	Závislost ε na poměru stran obdélníkového kanálu a indexu toku, včetně vyčísleného koeficientu determinace
3-4	Porovnání experimentálních dat s predikcí navržené rovnice (3.17)
3-5	Porovnání numerické simulace CFD s rovnicí (3.17)
3-6	Geometrie vyšetřovaných nekruhových profilů potrubí
3-7	Závislost ε na příslušném geometrickém parametru nekruhového kanálu a indexu toku, a) mezikruží, b) elipsa, c) symetrický profil L, d) čtvercový kanál s kruhovým jádrem
3-8	Schéma vytlačovacího reometru s mezikruhovou kapilárou
3-9	Schéma vytlačovacího reometru s obdélníkovou štěrbinou
3-10	Tvar mezikruhové kapiláry s okótovanými rozměry a vzdálenost tlakových snímačů podél kapiláry, a = 25 mm a b = 50 mm
3-11	Tvar obdélníkové kapiláry s okótovanými rozměry a vzdálenost tlakových senzorů podél kapiláry, a = 25 mm a b = 35 mm
3-12	Tlakové profily zaznamenané v čase pěti tlakovými senzory podél kapiláry s mezikruhovým průřezem
3-13	Tlakové profily zaznamenané v čase šesti tlakovými senzory podél kapiláry s obdélníkovým průřezem
3-14	Průběh tlaku v ústí kapiláry p_{exit} (dopočítaný) a tlaku ve válci p_{cont} (měřený)

3-15 Fotografie výtoku kolagenní hmoty z kruhové kapiláry reometru, sledování expanze materiálu v ústí materiálu, která se nepotvrdila

3-16 Porovnání Herschel Bulkley modelu (zelená čára) a mocninového modelu (červená čára) s experimentálními daty (modré body)

3-17 Schéma radiálního vytěsňovacího toku

3-18 Závislost síly na vzdálenosti desek při radiálním vytlačovacím toku, teplota 10 °C

3-19 Závislost síly na vzdálenosti desek při radiálním vytlačovacím toku, teplota 20 °C

3-20 Nelineární regrese naměřených dat pro rychlost stlačování 3 $mm.s^{-1}$ a teplotu vzorku 10 °C, body představují naměřená data, plná čára model

3-21 Závislost elektrické vodivosti (trojúhelníky) a měrné tepelné kapacity (plné body) na teplotě vzorku.

3-22 Schéma zařízení Microtron MT 25

3-23 Schéma modelu vycházející z kombinace Kelvin – Voight a Maxwell

3-24 Závislost elastického modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 10 °C

3-25 Závislost ztrátového modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 10 °C

3-26 Závislost elastického modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 20 °C

3-27 Závislost ztrátového modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 20 °C

3-28 Závislost elastického modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 30 ° C

3-29 Závislost ztrátového modulu na frekvenci oscilací a velikosti dávky ozáření, teplota vzorku 30 °C

3-30 Procentuální podíl frakcí velikostí molekul kolagenu pro různé dávky ozáření, indikované chromatografem, na ose x je čas [min], na ose y je intenzita absorbance [mAU]

4-1 Spojka typu Clamp ISO 2852

4-2 Sedlový ventil používaný v potravinářském průmyslu, tzv. mixing proof valve

4-3 Zubové čerpadlo pro čerpání pastovitých látek

4-4 Vřetenové čerpadlo

4-5 Čerpadlo typu Lobe

4-6 Horizontální lopatkový mísič Stuha Mixer Blender, Hnětač se Z-míchadly

4-7 Hnětač těsta MARATON 145, horizontální tyčový hnětač T-1164

4-8 Banbury hnětač – pracovní elementy

4-9 Jednošnekový A, dvoušnekový C extrudér a expeller B,

4-10 Hlava extrudéru pro výrobu těstovin (nerezová ocel, teflon, bronz)

4-11 Technologie výroby kolagenových střev [Přidal, 1988]

4-12 Možné případy řešení návrhu stroje-hnětače

4-13 Smykový tok v mezeře mezi rotujícím diskem a pevnou stěnou

4-14 Model navrženého mixéru, směr toku kolagenu je naznačen červenými šipkami,

4-15 Rozměry míchadla a mezery mezi míchadlem a diskem,

4-16 Procesní schéma zkušebního provozu navrženého míchadla

4-17 Závislost maximální velikosti částice při procesu dispergace na potřebném měrném výkonu pro její vytvoření příslušným zařízením

4-18 Závislost homogenity barvy produktu na měrné energii systému, nejvyšší hodnoty měrné energie odpovídají třem průchodům hmoty mísičem

4-19 Fotografie a) barevné hmoty, b) vyrobéné fólie, c) vyrobeného umělého střeva

4-20 Výstup vlastního programu hodnocení měření homogenity barvy, filtered area – představuje relativní plochu homogenní barvy

4-21 Vyšetřovaná oblast vnitřního objemu zařízení vyplněná strukturovanou sítí, 3 mil. buněk modelu

4-22 Porovnání experimentu a CFD simulace pro mezeru 1 mm

4-23 Porovnání experimentu a CFD simulace pro mezeru 3 mm

4-24 Příkonová charakteristika zařízení z CFD modelu

4-25 Kontury smykových napětí v radiální rovině vedené středem mezery mezi statorem a rotorem vlevo, a na vnějších plochách systému vpravo, velikost mezery 3 mm

4-26 Kontury smykových napětí v radiální rovině vedené středem mezery mezi statorem a rotorem vlevo, a na vnějších plochách systému vpravo, velikost mezery 1 mm

4-27 Vyznačené roviny, ve kterých byla provedena analýza rychlostního profilu

4-28 Závislost bezrozměrného axiálního rychlostního profilu na bezrozměrné radiální souřadnici pro tři otáčky rotoru a mezeru 3 mm mezi rotorem a statorem, rovina P1, a) hřídel, b) vstupní otvor v předním disku, b) + c) lopatka míchadla, d) mezera mezi lopatkou a válcovou stěnou zařízení, e) stěna zařízení

4-29 Závislost bezrozměrného axiálního rychlostního profilu na bezrozměrné radiální souřadnici pro tři otáčky rotoru a mezeru 3 mm mezi rotorem a statorem, rovina P2, a) hřídel, b) + c) lopatka míchadla, c) výstupní otvor v zadním disku, d) mezera mezi lopatkou a válcovou stěnou zařízení, e) stěna zařízení

4-30 Závislost bezrozměrné rychlosti smykové deformace bezrozměrné radiální souřadnici pro tři otáčky rotoru a mezeru 3 mm mezi rotorem a statorem, rovina P1, a) hřídel, b) vstupní otvor v předním disku, b) + c) lopatka míchadla, d) mezera mezi lopatkou a válcovou stěnou zařízení, e) stěna zařízení

4-31 Závislost bezrozměrné rychlosti smykové deformace na bezrozměrné radiální souřadnici pro maximální otáčky rotoru 500 min^{-1} a dvě mezery 1 a 3 mm mezi rotorem a statorem, rovina P1, a) hřídel, b) vstupní otvor v předním disku, b) + c) lopatka míchadla, d) mezera mezi lopatkou a válcovou stěnou zařízení, e) stěna zařízení

4-32 Basic design nového zařízení

SEZNAM TABULEK

Číslo	Název
2.1	Přehled reologického chování látek
2.2	Typické rozsahy rychlostí deformace pro různé druhy zpracovatelských procesů
2.3	Parametry mocninového modelu pro vybrané látky běžného použití
2.4	Meze toku vybraných potravinářských látek, orientační hodnoty
2.5	Smykový modul pružnosti pro některé potraviny
2.6	Relaxační čas a počáteční viskozita vybraných látek
3.1	Hodnoty geometrických parametrů a, b pro nenewtonskou kapalinu v obdélníkovém potrubí a parametr *C* pro Newtonskou kapalinu v obdélníkovém potrubí
3.2	Porovnání experimentálních dat a rovnice (3.17)
3.3	Hodnoty geometrických parametrů a, b pro nenewtonskou kapalinu v nekuhovém profilu potrubí, rozměry dle obr. 3-6
3.4	Rozměry a vypočítané geometrické parametry mezikruhové štěrbiny
3.5	Rozměry a vypočtené geometrické parametry obdélníkové štěrbiny
3.6	Parametry reologických modelů a modelu výstupního tlaku pro kolagenní hmotu (kolagen 1, obsah sušiny 6,6 % hm.), geometrie kapiláry κ = 0,664, rozsah smykových rychlostí (200-2000 s^{-1})
3.7	Parametry reologických modelů a modelu výstupního tlaku pro kolagenní hmotu (kolagen 2, obsah sušiny 7,2 % hm.), geometrie kapiláry κ = 0,664, rozsah smykových rychlostí (250-2500 s^{-1})
3.8	Parametry reologických modelů a modelu výstupního tlaku pro kolagenní hmotu (kolagen 3, obsah sušiny 8,0 % hm.), geometrie kapiláry κ = 0,664, rozsah smykových rychlostí (350-3000 s^{-1})
3.9	Parametry mocninového modelu pro různé geometrie kapiláry, skluz po stěně, (kolagen 1, obsah sušiny 6,6 % hm.), rozsah smykových rychlostí (200-2000 s^{-1})
3.10	Parametry mocninového modelu v závislosti na koncentraci sušiny v kolagenní hmotě, rozsah smykových rychlostí (350-2000 s^{-1}), κ = 0,664, τ_w počítáno pro konstantní smykovou rychlost 1000 s^{-1}
3.11	Parametry mocninového modelu v závislosti na různých geometriích kapiláry, (kolagen, obsah sušiny 9,5 % hm.), rozsah smykových rychlostí (1500 - 5000 s^{-1}), τ_w počítáno pro konstantní smykovou rychlost 1000 s^{-1}
3.12	Parametry mocninového modelu pro elongační sílu popsanou rovnicí (3.79), pro různé teploty a rychlosti stlačování,
3.13	Parametry modelu měrné tepelné kapacity a měrné elektrické vodivosti platné v rozsahu teplot 10 – 50 °C
3.14	Hlavní parametry Microtronu M 25
3.15	Parametry Maxwellova modelu v závislosti na teplotě a dávce ozáření kolagenní hmoty

3.16 Vyhodnocení parametrů závislostí Maxwellova modelu na teplotě a dávce ozáření

4.1 Přehled nejčastěji používaných ocelí pro potravinářský průmysl

4.2 Slitiny niklu nejběžněji zastoupené v potravinářském průmyslu

4.3 Polymery v potravinářském průmyslu

4.4 Vlastnosti kolagenní hmoty použité při zkušebních testech, platnost v rozsahu smykových rychlostí 200-2500 1/s

4.5 Orientační hodnoty rozsahu výkonu navrženého zařízení

4.6 Naměřená data

4.7 Experimentálně a numericky stanovené hodnoty konstanty k_s pro daný systém a viskoplastickou kapalinu