

České vysoké učení technické

Fakulta strojní

Ústav procesní a zpracovatelské techniky



Transportní vlastnosti kolagenu

Transport properties of collagen

Bakalářská práce

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

David Stoklas

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stoklas** Jméno: **David** Osobní číslo: **437104**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Transportní vlastnosti kolagenu

Název bakalářské práce anglicky:

Transport properties of collagen

Pokyny pro vypracování:

Jedním z přírodních materiálů používaných nejen v potravinářském průmyslu je kolagen. Při jeho zpracování vyvstává potřeba dopravy tohoto materiálu ze skladovacích prostor ke zpracovatelskému stroji. V rámci tématu práce se zaměřte na tyto cíle:

1. Popište strukturu a vlastnosti kolagenu. Jak se kolagen vyrábí a k čemu se používá?
2. Proveďte literární rešerši zaměřenou na transportní vlastnosti kolagenu a transportní zařízení vhodná pro daný typ látky.
3. Navrhněte čerpadlo pro dopravu kolagenu potrubím pro zadané a nalezené procesní parametry, průtok, reologické vlastnosti.
4. Navrhněte rám čerpadla s motorem s ohledem na provoz zařízení v potravinářské provozu.

Seznam doporučené literatury:

Fratzl P.: Collagen: Structure and Mechanics, Springer, New York, 2008.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

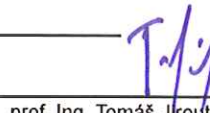
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.06.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


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


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

26-04-2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne 21. 5. 2018

.....

David Stoklas

Anotační list

Jméno autora:	David Stoklas
Název BP:	Transportní vlastnosti kolagenu
Anglický název:	Transport properties of collagen
Akademický rok:	2017/2018
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Vedoucí BP:	Ing. Jan Skočilas, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 48 Počet obrázků: 19 Počet tabulek: 3 Počet příloh: 2
Klíčová slova:	kolagen, viskoelastické látky, mocninné látky, potravinářství, čerpadla
Keywords:	collagen, viscoelasticity, power fluids, food engineering, pumps
Anotace:	Práce se zabývá vlastnostmi kolagenní hmoty. Řeší její strukturu, fyzikální vlastnosti a v první řadě její reologické vlastnosti. Zjištěné parametry jsou použity pro výpočet tlakové ztráty v potrubí. Následně je pro zadané hodnoty navrženo vhodné čerpadlo, které zajistí požadované čerpací parametry. Při konstrukci jsou brány v potaz obecné požadavky pro použití v potravinářském průmyslu.
Abstract:	This work describes properties of collagen. It describes its structure, physical properties and mainly its rheological properties. This information is then used for calculation of pressure loss in pipe system. This value allows us to design appropriate pump, which provides required pumping parameters. The requirements for use in the food industry are considered during construction design.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce panu Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za odborný dohled, cenné rady a poskytnutí literatury, která pro mne byla užitečná nejen při psaní této práce. Díky patří také kolektivu společnosti AxFlow s.r.o. za poznatky z praxe. Poděkovat chci ještě mé rodině, bez jejíž morální podpory by bylo studium o poznání těžší.

Obsah

1	Úvod	9
2	Vlastnosti kolagenu	10
2.1	Obecné vlastnosti kolagenu a jeho využití	10
2.2	Molekulární struktura.....	11
2.2.1	Primární struktura	11
2.2.2	Sekundární struktura	11
2.2.3	Terciární struktura.....	11
2.2.4	Kvartérní struktura	12
2.3	Reologické vlastnosti	12
2.3.1	Viskoelasticita	13
2.3.2	Měření viskoelastických vlastností creepovým testem	14
2.3.3	Měření viskoelastických vlastností relaxačním testem	16
2.3.4	Měření viskoelastických vlastností oscilačním testem	17
2.4	Transportní vlastnosti kolagenu.....	18
2.4.1	Měření v kruhové štěrbině.....	18
2.4.2	Měření v obdélníkové štěrbině	19
2.4.3	Zvolené parametry pro další výpočet	19
2.5	Shrnutí vlastností kolagenu	20
3	Návrh čerpadla.....	21
3.1	Čerpadla vhodná pro čerpání vysokoviskózních látek	21
3.1.1	Zubová čerpadla	21
3.1.2	Vřetenová čerpadla	22
3.1.3	Čerpadla s rotačními písty	23
3.2	Zvolený typ čerpadla	24
4	Návrhové výpočty a analýza proudění	25
4.1	Výpočet tlakové ztráty v potrubí	25
4.2	Selekce čerpadla	29

4.2.1	Technická specifikace čerpadla.....	30
4.2.2	Kontrola oteplení čerpaného média	31
4.3	Shrnutí provozních parametrů čerpadla.....	32
5	Konstrukce sestavy čerpadla	34
5.1	Základní konstrukční požadavky pro zařízení v hygienicky náročném provozu .	34
5.1.1	Doporučené materiály	34
5.1.2	Konstrukce a svařování	35
5.2	Další použité komponenty.....	35
5.2.1	Pohon čerpadla	35
5.2.2	Hřídelová spojka	36
5.2.3	Základový rám a jeho dílčí součásti	36
5.3	Pevnostní kontrola.....	37
5.3.1	Kontrola průhybu pod převodovkou	38
5.3.2	Kontrola průhybu pod čerpadlem.....	39
5.3.3	Kontrola vzpěru stavěcích nohou	39
5.4	Montáž, provoz a údržba soustrojí	40
5.4.1	Montáž soustrojí.....	40
5.4.2	Provoz a údržba	41
6	Závěr.....	43
7	Seznam použitých zdrojů a literatury.....	45
8	Seznam obrázků	47
9	Seznam tabulek	48
10	Seznam příloh	48

Seznam použitých fyzikálních veličin

c_p – Měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

F – Síla [N]

G – Modul pružnosti v tahu [Pa]

G' – Soufázový modul [Pa]

G'' – Ztrátový modul [Pa]

J – Kvadratický moment průřezu [mm^4]

K – Koeficient konzistence [$\text{Pa} \cdot \text{s}^m$]

m – Index toku [1]

\dot{m} – Hmotnostní průtok [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]

M_K – Krouticí moment [N.m]

Δp – Tlaková ztráta [Pa]

P – Výkon [W]

Q – Teplo [J]

Re_{MR} – Reynoldsovo číslo dle Metzger – Reeda [1]

T – Teplota [$^{\circ}\text{C}$]

\bar{u} – Střední rychlost proudění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

\dot{V} – Objemový průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

$\dot{\gamma}_w$ – Rychlost změny deformace [s^{-1}]

η – Zdánlivá viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$]

$\eta_{\text{úč}}$ – Účinnost [1]

ρ – Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

τ_w – Napětí na stěně potrubí [Pa]

1 Úvod

Kolagen je v živočišné říši nejhojněji zastoupeným proteinem, v lidském těle dokonce tvoří až jednu třetinu všech proteinů. Díky svým specifickým vlastnostem našel kolagen své uplatnění v potravinářském průmyslu. Při výrobě uzenin je potřeba, aby byla hmota uvnitř například párku pevně uzavřena. Dříve tento účel plnila živočišná střeva. Avšak s rostoucí spotřebou hledaly výrobní závody náhražku, kterou našli právě v kolagenu [1].

Kolagenní hmotu, což je směs vody a extrahovaného kolagenu z hovězí kůže, používaná v potravinářství, lze popsat jako neneutonskou viskoelastickou kapalinu. Pro potřeby praxe a výpočtů se však používá jednodušší mocninný model. Jeho struktura spíše než kapalinu jako takovou připomíná těsto. Nároky na čerpadlo pro tuto látku jsou tedy velmi vysoké.

Tato práce se zabývá reologickými vlastnostmi kolagenu, a jak se dají tyto vlastnosti experimentálně měřit a analyzovat pomocí matematických modelů. Další částí této práce bude samotný návrh potrubní trasy včetně vhodného čerpadla mezi nádobou pro skladování kolagenní hmoty a extruderem, který slouží k výrobě samotného umělého střeva. Celý koncept konstrukce proběhl s ohledem na hygienické požadavky potravinářského průmyslu.

2 Vlastnosti kolagenu

2.1 Obecné vlastnosti kolagenu a jeho využití

Pokud se podíváme na kolagenní hmotu, tak nám na první pohled bude připomínat chlebové těsto. Surový kolagen má světle béžovou barvu, ve vodě je nerozpustný a jeho měrná hmotnost se pohybuje kolem hodnoty 880 kg/m^3 . Dále patří mezi takzvané vláknité proteiny (jinak označované jako fibrilární).

Kolagen je nejvíce rozšířeným proteinem v živočišné říši. Patří mezi základní stavební bílkoviny, které tvoří pojivové tkáně v pohybovém aparátu živočichů (například tvoří matici kostí, chrupavek, šlach, kůže či některé části zrakových orgánů) [1].

V dnešní době známe kolem třiceti různých druhů kolagenu, jejichž struktura a chemické složení se vzájemně liší. Jenom u lidských organismů rozlišujeme více než jedenáct druhů kolagenu. Z hlediska praktického využití jsou nejvýznamnější typy I, II, III a IV. První typ najdeme v kůži, šlachách nebo v kostech; druhý v chrupavkách a třetí například ve stěnách cév.

Jedno z hlavních využití kolagenu najdeme v potravinářském průmyslu. Zde se užívá jako obalový materiál uzenářských výrobků. S rostoucí produkcí těchto potravin vyvstala otázka, jak nahradit živočišné střevo. Tento materiál musí být požitelný a musí být natolik pevný a odolný vůči vysoké teplotě, aby se obsah z tohoto obalu nedostal mimo něj. Díky živočišnému původu kolagenu a jeho reologickým vlastnostem, ke kterým se ještě v rámci této práce dostaneme, spočinula pozornost výrobců právě na této látce. Tyto kladné vlastnosti pro právě tuto konkrétní aplikaci však s sebou nesou náročné požadavky na návrh výrobního procesu [3].

Kromě potravinářství se s kolagenem setkáme také ve farmaceutickém průmyslu, kosmetice nebo medicíně. Díky tomu, že samotný kolagen najdeme v lidském těle jako stavební složku krevních cév a jiných důležitých tkání, je používán při situacích, kdy jsou například cévy poškozeny, a kolagen se použije jako náplast.

2.2 Molekulární struktura

Jak již bylo řečeno, kolagen je protein. Je charakteristický díky řetězovité struktuře, díky níž má své vlastnosti. Pro bližší zkoumání kolagenu rozdělíme jeho strukturu na čtyři podstruktury.

2.2.1 Primární struktura

Primární struktura kolagenu se skládá z jednotlivých aminokyselin, které jsou uspořádány do molekul. Ve valné většině případů se jedná o následující – glycin, prolin, hydroxyprolin a hydroxylysin. Tato struktura jako taková je dána pořadím, v jakém jsou výše uvedené látky za sebou v řetězci uspořádány. Vlastnosti a rozdíly jednotlivých druhů kolagenu jsou určeny právě pořadím a prezencí určitých druhů aminokyselin [1].

2.2.2 Sekundární struktura

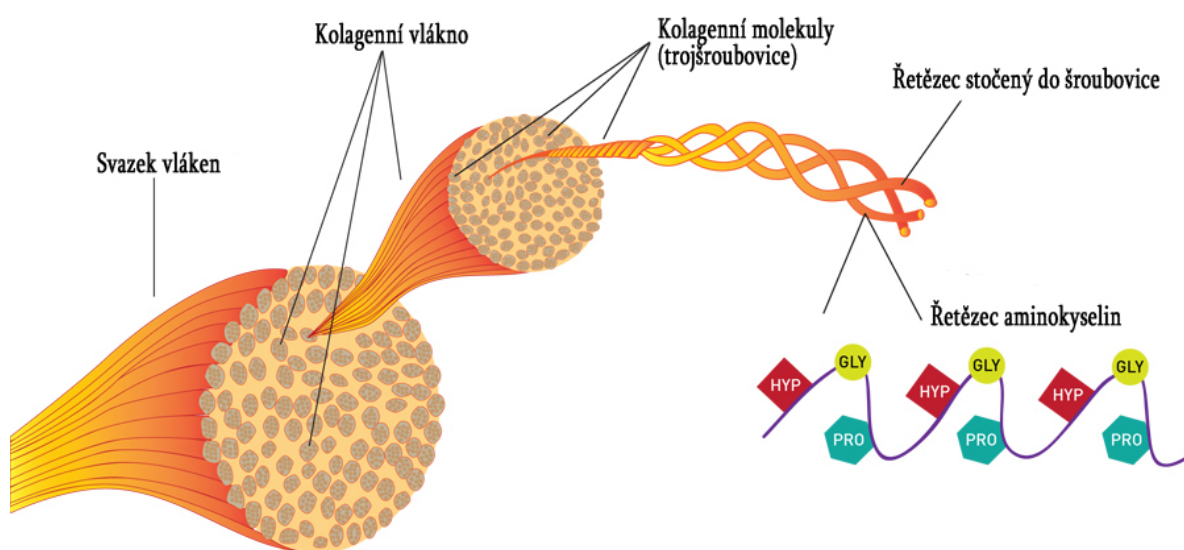
Tato struktura popisuje prostorové uspořádání sekvence spojených aminokyselin. Sekundární struktura kolagenu je pravidelná levotočivá šroubovice. Z pozorování bylo zjištěno, že výška jednoho závitu je asi 0,95 nm, jeho stoupání je zhruba 0,28 nm. Zajímavostí je, že není symetrická kolem své osy šroubového pohybu nýbrž kolem osy, kolem níž se jednotlivé šroubovice obtáčejí v terciární struktuře [1].

2.2.3 Terciární struktura

Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, terciální struktura se skládá ze tří vzájemně se obtáčejících levotočivých šroubovic ze struktury sekundární. Oproti struktuře předchozí jde tentokrát o šroubovici pravotočivou o celkovém průměru 1,5 nm. Tato struktura je soudržná díky vodíkovým vazbám, vytváří se tak vláknitá neboli fibrilární struktura [1].

2.2.4 Kvartérní struktura

Poslední úroveň stanovuje kolagen jakožto vláknitou bílkovinu. Kolagenní vlákno neboli fibrila se dá pozorovat pod mikroskopem (na obrazu je můžeme spatřit jako tmavší místa), jelikož jeho průměr se pohybuje od jednoho do deseti mikrometrů. Vlákna jsou dále měkká, ohebná, nepružná a mají relativně vysokou pevnost v tahu. Například kolagen získaný z hovězí Achillovy šlachy má hodnotu Youngova modulu pružnosti v tahu 3 GPa. Tato hodnota byla zjištěna metodou rentgenové difrakce [1] [2].



Obrázek 1 - Struktura kolagenu [7]

2.3 Reologické vlastnosti

Kolagen patří mezi neneutronovské látky. Nejjednodušeji a zároveň pro inženýrskou praxi nejčastěji lze kolagenní hmotu popsat jako čistě viskózní pseudoplastickou kapalinu, tedy mocninným modelem, který využívá k popisu reologického chování dvou konstant – index toku a koeficient konzistence. Pro budoucí výpočty při návrhu procesu čerpání budeme potřebovat způsob, jak toto chování popsat matematickými rovnicemi.

2.3.1 Viskoelasticita

Při viskoelastickém chování závisí napětí nejen na rychlosti deformace, ale také na deformaci jako takové stejně jako u elastických látek. Při inženýrském výpočtu se užívají jen zřídka [18]. Nejsnadnější způsob pochopení viskoelastických vlastností je analogie z dynamiky se soustavou pružin a tlumičů. Představme si, že elastické vlastnosti představuje pružina o modulu pružnosti G , ve které vzniká vlivem deformace γ napětí o velikosti σ [4].

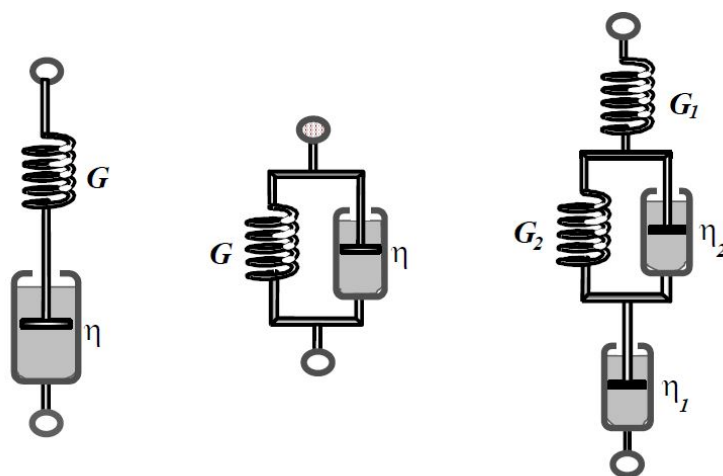
$$\sigma = G \cdot \gamma \quad 2.3-1$$

Vlastnosti viskozity v tomto modelu představuje tlumič. Ve válci s velice viskózní kapalinou se pohybuje píst, jehož pohyb je tlumen právě touto kapalinou. Tuto mechanickou interakci můžeme popsat touto rovnicí [4]:

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad 2.3-2$$

Kde člen η představuje dynamickou viskozitu a $\dot{\gamma}$ je velikost rychlosti deformace.

Tyto jednoduché modely můžeme následně spojit do celků, které popisují viskoelastické vlastnosti jako jeden systém. Existují celkem tři základní modely – Maxwellův (pružina a tlumič zapojeny sériově), Kelvin – Voigtův (paralelní zapojení tlumiče a pružiny) a superpozicí předchozích dvou získáme Burgersův model [4].



Obrázek 2 - Modely představující viskoelastické chování [4]

Díky zmíněným matematickým modelům lze pomocí několika metod popsat chování viskoelastických látek. Vycházíme z předpokladů, že pokud deformujeme kapalinu, termodynamické síly budou mít snahu nastolit stav o minimální energii. Můžeme si to představit na natažené lineární pružině, ta se také po jejím stlačení či natažení opět vrátí do původní polohy. Toto chování odvozené od pružin představuje, jak již bylo zmíněno, elastické vlastnosti látek jako je právě kolagen. U některých látek se elasticita projevuje více. I u běžných newtonských látek jsme za určitých podmínek schopni pozorovat elastické jevy buď ve velmi malých časových intervalech, nebo při opravdu vysoké frekvenci s jakou vzorek kmitá.

Tyto látky s čitelnou vnitřní strukturou vykazují silné viskoelastické vlastnosti a díky mechanickým zkouškám můžeme zjišťovat vliv této mikrostruktury na jejich chování a pro zpracovatelský průmysl tolik potřebné transportní vlastnosti.

Existuje několik metod, jak získat elastický parametr G a viskózní η . V této práci podrobněji rozebereme celkem tři základní [4].

2.3.2 Měření viskoelastických vlastností creepovým testem

Creepové měření je, co se proveditelnosti a následné matematické analýzy týče, ze jmenovaných metod patrně tou nejsnazší. Toto měření je mimo jiné hojně využíváno v metalurgii převážně u strojních aplikací, kde se vyskytují vysoká napětí, které působí v dlouhých časových úsecích.

Měřicí aparatura je jednoduchá. Měřený vzorek se uchytí do dvou čelistí, které se postupně od sebe oddalují, čímž se do vzorku vnáší napětí a tudíž se i zvětšuje jeho deformace.

Chování vzorku při tomto měření lze demonstrovat na Burgersově modelu, kde první osamocená pružina představuje okamžitou elastickou odezvu, paralelně zapojená pružina s tlumičem zase opožděnou elastickou odezvu, přičemž ono zpoždění je způsobeno právě

přítomností paralelně zapojeného tlumiče, a poslední element – osamocený tlumič – představuje ustálenou viskózní odezvu [4].

Při creepovém měření lze chování Burgersova modelu popsat následující rovnicí [4]:

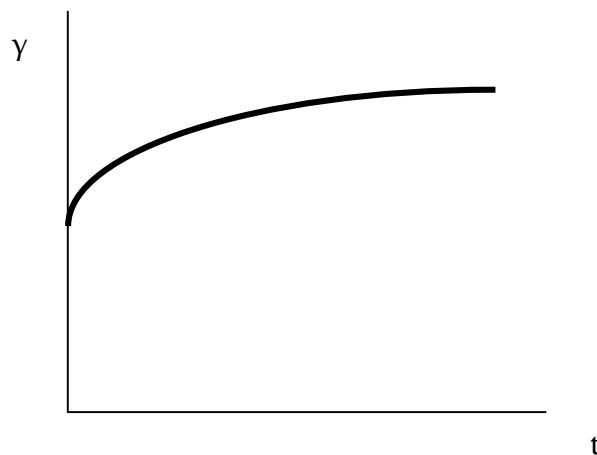
$$\frac{\gamma(t)}{\sigma} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} (1 - e^{t/\tau}) + \frac{t}{\eta_1} \quad 2.3-3$$

Kde γ je měřená deformace vzorku, σ je známé napětí aplikované na vzorek, G_1 a G_2 jsou hodnoty Youngova modulu pružnosti, η_1 je hodnota viskozity, představovaná osamoceným tlumičem a člen τ je hodnota tzv. relaxačního času, o nějž je zpožděna elastická deformace pružiny G_2 . Relaxační čas lze vypočítat následovně [4]:

$$\tau = \frac{\eta_2}{G_2} \quad 2.3-4$$

Kde η_2 je viskozita představovaná paralelním tlumičem a G_2 je již zmíněný Youngův modul pružnosti. Z naměřených hodnot deformace jsme pak schopni pomocí zmíněného matematického aparátu získat hodnoty Youngova modulu pružnosti i viskozity [4].

Závislost deformace na čase obecně vypadá následovně:



Obrázek 3 - Závislost deformace na čase při creepovém testu [4]

2.3.3 Měření viskoelastických vlastností relaxačním testem

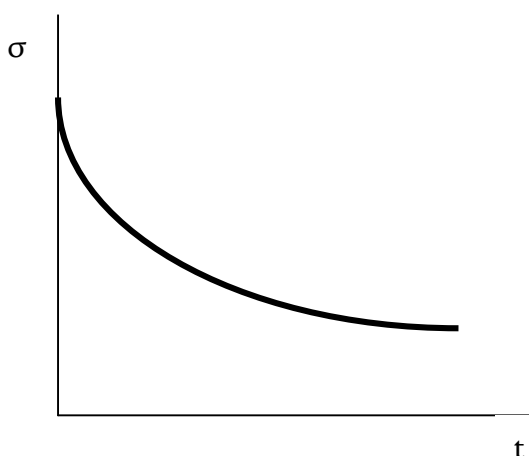
Neméně dostupnou metodou, jak získat hodnoty G a η je drobná modifikace creepového testu. Aparaturu jako takovou změníme jen minimálně. Relaxační měření se od toho creepového liší následovně: měřený vzorek je opět uchycen do čelistí a je natažen o předem určenou deformaci γ . Jakmile přestaneme silově na vzorek působit, začne se vracet na původní délku a zároveň se bude snažit o nastolení stavu o minimální energii – hodnota zbytkového vnitřního pnutí postupně bude klesat vlivem změny struktury. V materiálu totiž dochází k tzv. relaxaci. Při této metodě právě měříme závislost zmíněné klesající hodnoty vnitřního napětí σ na čase t . Při tomto měření si pomůžeme Maxwellovým modelem, který jsme již popisovali, a následující rovnicí [4]:

$$\frac{\sigma(t)}{\gamma} = G e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 2.3-5$$

Hodnota viskozity je opět obsažená ve výrazu τ , jenž opět představuje retardační čas a je podílem právě viskozity a Youngova modulu pružnosti. Abychom byli schopni přesně aproximovat hledané hodnoty modulu pružnosti a viskozity, aplikujeme více sériově zapojených Maxwellových modelů. Výsledný model je popsán následující rovnicí [4]:

$$\frac{\sigma(t)}{\gamma} = G_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + G_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + G_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}} + \dots + G_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad 2.3-6$$

Změřená časová závislost napětí σ vypadá následovně:



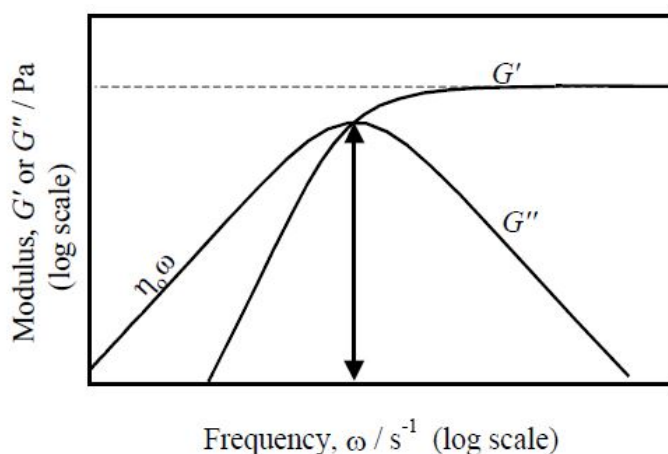
2.3.4 Měření viskoelastických vlastností oscilačním testem

Tato metoda je ze všech výše jmenovaných nejosfistikovanější, nejkomplicovanější ale zároveň nejpoužívanější. I přes to, jako všechny zbylé metody, má jistá omezení. Tak jako u creepových testů jsme se mohli setkat s anomáliemi při krátkých časech měření, tak podobná úskalí potkáváme při vysokých frekvencích právě u oscilační metody.

Obrázek 4 - Závislost napětí na čase při relaxačním testu

Principiálně vychází oscilační měření z výše uvedených dvou metod. Spočívá v tom, že měřený vzorek buď zatížíme známou hodnotou síly a měříme deformaci nebo vzorek deformujeme a měříme vnitřní pnutí. Obojí však aplikujeme v sinusovém průběhu a tudíž i výstup bude logicky periodický avšak fázově posunutý [4].

Měřenou kapalinu můžeme pomyslně rozdělit na dvě struktury. Tu první uvažujeme, že se chová jako pevná látka a charakterizuje ji veličina G' , která se označuje jako soufázový modul. Ta druhá, jež představuje chování kapaliny, se označuje jako G'' ; její název je ztrátový modul [19]. Hodnoty obou zmíněných veličin jsou proměnlivé v závislosti na frekvenci, s níž na měřenou látku aplikujeme napětí [4].



Obrázek 5 - Závislost G' a G'' na frekvenci v logaritmickém měřítku [4]

Na grafu výše vidíme typický průběh modulů na frekvenci napětí. Tato závislost odpovídá použití Maxwellova matematického modelu – tlumič a pružina v sériovém zapojení [4].

Hodnoty modulů můžeme použít při dalších výpočtech. Obecně je výhoda oscilačních testů v tom, že jsme schopni zjistit chování látky při rychlých změnách zatížená. Oproti tomu creepové testy jsou užitečné v tom, že zjišťujeme odezvu na dlouhodobě namáhání.

2.4 Transportní vlastnosti kolagenu

Pro výpočet transportních parametrů mocninných látek jako je například kolagen potřebujeme v první řadě hodnoty koeficientu konzistence a indexu toku. Jak uvidíme dále v práci, pomocí nich můžeme vypočítat tlakovou ztrátu, rychlostní profil a posléze například i zdánlivou viskozitu.

2.4.1 Měření v kruhové štěrbině

Jednou z možností, jak zmíněné hodnoty změřit, je použití kapilárního reometru s kruhovou štěrbinou. Trasa, kterou byl hovězí kolagen vytlačován pomocí hydraulického pístu, byla opatřena tlakovými čidly, které snímaly profil tlakové ztráty.

Byl použit hovězí kolagen. Pro kolagenní vodný roztok s koncentrací 8% pevné složky a v rozsahu rychlostí změny deformace od 350 s^{-1} do 3000 s^{-1} byla změřena následující data [15].

	Power law		Herschel Bulkley			Exit pressure		
	n [–]	K [Pa·s ^{n}]	n [–]	K [Pa·s ^{n}]	τ_y [Pa]	m [–]	K_e [Pa ^{1/m]}]	τ_{\max} [Pa]
Value	0.233	1700	0.291	960	1500	4.79	$3.8 \cdot 10^{-11}$	12300
Standard deviation	0.017	204	0.021	263	945	1.68	$4.9 \cdot 10^{-11}$	740

Tabulka 1 - Naměřená data pro kapilární reometr [15]

V tabulce je v levém sloupci (pro mocninný model) označen index toku jako n .

2.4.2 Měření v obdélníkové štěrbině

Toto měření se podobá tomu zmíněnému v kapitole 2.4.1. Zde však byl kapilární reometr s kruhovou geometrií nahrazen reometrem s obdélníkovou štěrbinou. V tomto měření byl opět použit roztok s hovčím kolagenem s obsahem tuhé složky 9,5%.

Kolagenní hmota byla opět protlačována pomocí hydraulického pístu trasou, která byla opatřena tlakovými čidly. Byly použity celkem tři druhy štěrbin, které se lišily svojí geometrií [16].

Power Law	H/W = 0.05		H/W = 0.10		H/W = 0.20	
	n [-]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	K [Pa.s ⁿ]
Value	0.161	8700	0.275	850	0.283	990
Standard deviation	0.073	3400	0.016	85	0.050	330

Tabulka 2 - Naměřená data v reometru s obdélníkovou štěrbinou [16]

Problémem je u kolagenu, že spíše než tekutina se chová jako těsto, proto jsou tato měření složitá a u hodnot koeficientu konzistence můžeme pozorovat vysoké hodnoty směrodatných odchylek.

Měření v obdélníkové štěrbině proběhlo v rozsahu 1500 s⁻¹ až 5000 s⁻¹ [16].

2.4.3 Zvolené parametry pro další výpočet

Pro další výpočty byly zadány tyto parametry kolagenu:

Koeficient konzistence $K = 1250 \text{ Pa.s}^m$

Index toku $m = 0,28$

Je nutné zmínit, že ve výpočtové části níže dojdeme k závěru, že pro parametry našeho potrubí, bude rychlost změny deformace řádově nižší, než byla ta, při níž byla výše zmíněná data naměřena. Předpokládáme však, že index toku se nebude výrazně měnit v oblasti nízkých smykových deformací. Hodnota koeficientu konzistence vychází z doposud nepublikovaného reologického měření, jež proběhlo při testování míchání kolagenní hmoty.

2.5 Shrnutí vlastností kolagenu

Pro další výpočty jsme zjistili, že chování kolagenu je poněkud nestandardní. Vykazuje silně neneutronovské chování. Pro inženýrské výpočty lze využít právě mocninný model.

Pomocí několika matematických metod a různých typů laboratorních měření lze tyto vlastnosti změřit, aby byly budoucí výpočty co možná nejvíce odpovídající. I přes složitost molekulární struktury kolagenu, která mechanické a fyzikální vlastnosti způsobuje, nás jako taková při návrhu procesů z větší části nezajímá.

Při výpočtu tlakových ztrát jsou tedy stěžejní hodnoty indexu toku, měrné hmotnosti a koeficientu konzistence.

V rámci literární rešerše byla nalezena spousta dalších prací, kde se reologickým chováním roztoku kolagenu zabývají. V drtivé většině prací bylo použito ke stanovení reologického chování rotačního reometru. Nejčastěji se ale používá nikoliv rotačních, ale oscilačních testů. Aby se takové měření mohlo uskutečnit, je třeba použít hmotu s velmi nízkou koncentrací kolagenu, která se chová více jako kapalina v porovnání s naší „těstovitou“ strukturou.

Vzhledem k tomu, že je index toku závislý na koncentraci kolagenu ve vodném roztoku, bylo rozhodnuto data z těchto článků nevyužít, ačkoliv byly stanoveny v rozmezí smykových rychlostí odpovídající zadanému příkladu, jež bude v této práci řešen níže. Proto byl učiněn předpoklad, že pro naše inženýrské výpočty budou použitelné spíše hodnoty reologického modelu stanovené pro stejnou koncentraci kolagenu a stejný typ proudění.

Viskoelastické vlastnosti kolagenu se projeví především při změnách rychlosti deformace, například vlivem náhlých změn geometrie nebo směru toku. Vzhledem k tomu, že naším úkolem je stanovit tlakovou ztrátu pro přímé potrubí, viskoelastické chování kolagenu bude v další části zanedbáno. V případě čerpadla, kde by viskoelastické chování mohlo hrát roli, budeme uvažovat určitou rezervu v určení jeho pracovního bodu.

3 Návrh čerpadla

3.1 Čerpadla vhodná pro čerpání vysokoviskózních látek

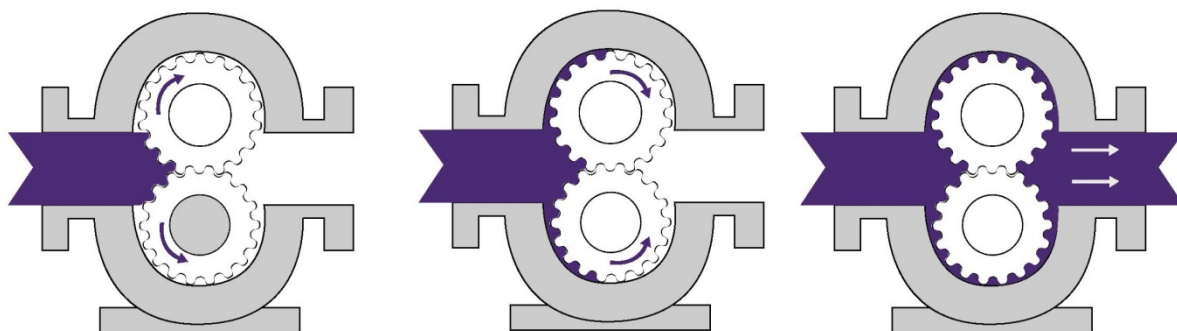
V potravinářském a zpracovatelském průmyslu se setkáváme s nepřehledným množstvím látek s různými vlastnostmi. Ať už jde o chemické vlastnosti jako toxicita, reaktivita a agresivita vůči okolnímu prostředí, tak i fyzikální jako viskozita, hustota nebo také občas musíme brát v potaz obsah pevných částic v čerpaném médiu. Celé toto portfolio atributů bychom proto měli uvažovat při volbě vhodného čerpadla. Dále, to hlavně v potravinářství, je potřeba myslet na to, aby čerpadlo nezneškodilo látku, a krom toho musí být snadno čištěno, aby nedošlo v čerpacím systému například k nežádoucímu množení mikroorganismů.

V dnešní době nabízí výrobci čerpací techniky širokou škálu výrobků. Avšak pro naši aplikaci, jíž je čerpání kolagenní hmoty, se jich nabízí pouze pár z nich. O fyzikálních vlastnostech kolagenu jsme již mluvili. Díky tomu v potrubní síti vznikají relativně vysoké tlakové ztráty, které musí námi zvolené čerpadlo překonat. Kolagen je také tepelně nestálý a tudíž je potřeba, aby byla potrubní trasa včetně samotného čerpadla kontinuálně chlazena, aby nedošlo k degradaci kolagenu.

3.1.1 Zubová čerpadla

Pro čerpání viskózních látek se používají například zubová čerpadla. Médium je čerpáno dvojicí ozubených kol. Díky této konstrukci je čerpání velice přesné a nedochází k pulzacím, což pro naši aplikaci zase tak nepotřebujeme. Bohužel tato čerpadla oproti jiným, k nimž se ještě dostaneme, nedokážou generovat kýžený přetlak, který právě pro naši aplikaci potřebujeme [8] [12].

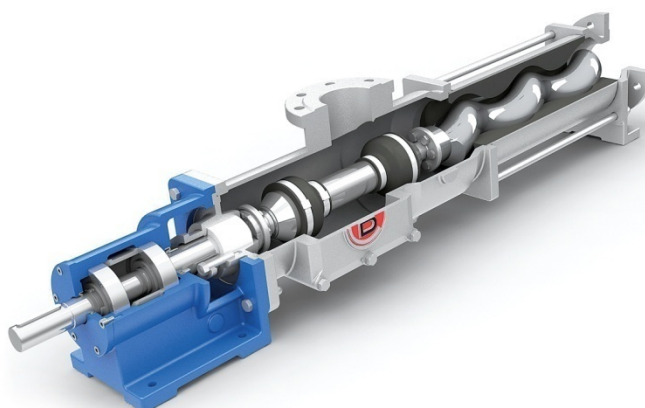
Zubové čerpadlo by navíc kvůli tvaru ozubených kol a velikosti jejich otáček mohlo porušit strukturu kolagenu, a tak by byla znemožněna jeho korektní extruze do tvaru např. umělých střev.



Obrázek 6 - Schéma zubového čerpadla [12]

3.1.2 Vřetenová čerpadla

Dalším čerpadlem vhodné pro práci s takovými látkami jsou vřetenová čerpadla. Látka je dopravována pomocí rotačního pohybu hřídele šroubovitého tvaru ve statoru, jehož tvar je negativem tohoto hřídele. Na stejném principu pracuje i jeden z nejstarších typů čerpadel – starověký Archimédův šroub. Tyto pumpy se používají převážně ve vodohospodářství, neboť velice snadno čerpají znečištěnou kalovou vodu. Avšak dají se použít i v potravinářství. Tyto pumpy jsou navíc velice mechanicky odolné. Nicméně u těchto čerpadel je problém s případným otopem / chlazením, je tedy nutné v případě potřeby řešit tepelnou výměnu v potrubí před a za pumpou. Vřetenovky mají navíc oproti jiným typům čerpadel velké rozměry, i proto je čerpání tepelně náročných látek těmito pumpami problematické [9].



Obrázek 7 - Řez tělem vřetenového čerpadla [9]

3.1.3 Čerpadla s rotačními písty

Zdaleka nejvhodnějším typem čerpadla pro transport kolagenní hmoty jsou pumpy s rotačními písty. Řada výrobců se navíc vyloženě orientuje na aplikace do potravinářského průmyslu a i proto jsou tyto čerpadla pro naši aplikaci vhodná. Čerpadla se vyrábějí celonerezová, standardem je ocel AISI 316 či AISI 316 L se zvýšeným obsahem legur. Celý pracovní prostor je uzavřen dle potřeby buď jednoduchou či dvojitou mechanickou ucpávkou. V potravinářství většinou nepracujeme s toxickými látkami, tudíž nejsou potřeba ucpávky magnetické.

Největší modely čerpadel s rotačními písty jsou schopny čerpat až 150 m³ média za hodinu při výtlaku až 35 barů.



Obrázek 8 - Čerpadlo s rotačními písty s odejmutou hlavou [10]

V potravinářství oceníme především tyto vlastnosti:

- možnost otápěného / chlazeného těla pumpy
- možnost celonerezového provedení (těla pump jsou povětšinou vyráběna z lité oceli)
- hygieničnost (možnost proplachu ucpávky, snadno odnímatelná hlava čerpadla, konstrukce těla umožňuje snadné stékání kapalin)
- příklady čerpatelných médií: omáčky, mýdla, tuky, oleje, tvaroh, čokoláda, roztavené bonbony, máslo, těsto, ...
- dostupné materiály těsnících komponent – EPDM, FKM, Si-C

Maximální otáčky těchto pump se pohybují kolem hodnoty 600 ot/min. Proto je potřeba pro jejich pohon použít převodový motor. Díky těmto nízkým otáčkám navíc zpravidla nedochází k poškození čerpaného média, lze tedy bez problému čerpat například jogurty s kusy ovoce, aniž by došlo k jeho rozmačkání.

Nevýhodou těchto pump oproti výše zmíněným je řádově vyšší pořizovací cena. Navíc nám pro pohon nestačí samotný elektromotor, neboť nejmenších počet otáček za minutu, na který se v síti 50 Hz jsme schopni dostat, se pohybuje kolem 800 ot/min [10].

3.2 Zvolený typ čerpadla

Byly uvedené vhodné typy čerpadel pro zadanou transportovanou látku, především zubová, vřetenová a s rotujícími písty. Vzhledem k výše uvedeným výhodám a i přes vědomé nevýhody, a díky autorovým praktickým zkušenostem návrhu čerpadel pro potravinářský průmysl byl jako nejlepší typ čerpadlo pro transport kolagenní hmoty zvolen typ s rotujícími písty.

4 Návrhové výpočty a analýza proudění

Abychom mohli navrhnout vhodné čerpadlo pro naši potrubní trasu, je potřeba znát tlakovou ztrátu, ke které dojde při zadaných parametrech mezi nádobou s kolagenní hmotou a extruderem, kam ji chceme dopravit. Vytlačovací hlava sama o sobě představuje nemalý zdroj tlakové ztráty, avšak předpokládáme, že před ní bude umístěno ještě dávkovací čerpadlo nebo bude mít extruzní hlava vlastní pohon.

Pro připomenutí, kolagen je neneutronovská mocninná látka, kterou lze pro rychlé provozní výpočty popsat mocninným modelem. Tudiž nám nestačí základní vzorce pro výpočet tlakové ztráty pro newtonovské látky, jako je například voda. V použitých rovnicích je třeba zohlednit parametry, jež popisují právě toto specifické chování. Právě to popisují hodnoty indexu toku a koeficientu konzistence.

4.1 Výpočet tlakové ztráty v potrubí

Hodnotu tlakové ztráty pro proudění mocninné látky v potrubí kruhového tvaru můžeme obecně získat z následující rovnice [3]:

$$\Delta p = \frac{2 \cdot k \cdot L}{R} \left[Q \cdot \frac{3 + \frac{1}{m}}{\pi \cdot R^3} \right]^m \quad 4.1-1$$

Ve výše uvedené rovnici jsou, jak vidíme, zohledněny všechny parametry, díky nimž získáme požadovanou hodnotu tlakové ztráty. Kromě toho se dá tato rovnice využít i při experimentálním zjišťování například indexu toku, kdy na potrubní trase o známé geometrii a průtoku měříme mezi dvěma body tlakovou ztrátu, díky čemuž jsme schopni dopočítat hodnotu indexu toku.

Provedeme výpočet pro náš proces. Máme zadány následující hodnoty:

Délka potrubní trasy	$L = 10 \text{ m}$
Vnitřní poloměr potrubí	$R = 0,025 \text{ m}$
Požadovaný průtok	$Q = 3,775 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Hustota kolagenní hmoty	$\rho = 883 \text{ kg/m}^3$
Koeficient konzistence	$K = 1250 \text{ Pa}\cdot\text{s}^m$
Index toku	$m = 0,28$

Před začátkem výpočtu je nutné zjistit, zda půjde o proudění laminární či turbulentní. To ověříme pomocí hodnoty Reynoldsova čísla. Pro proudění mocninné látky provedeme výpočet pomocí obecné rovnice Reynoldsova čísla dle Metzner-Reeda [3].

$$\text{Re}_{\text{MR}} = \frac{\rho \cdot u^{2-m} \cdot D^m}{8^{m-1} \cdot K} \quad 4.1-2$$

$$\text{Re}_{\text{MR}} = \frac{883 \cdot 0,019^{2-0,28} \cdot 0,05^{0,28}}{8^{0,28-1} \cdot 1250}$$

$$\text{Re}_{\text{MR}} = 1,49 \cdot 10^{-3}$$

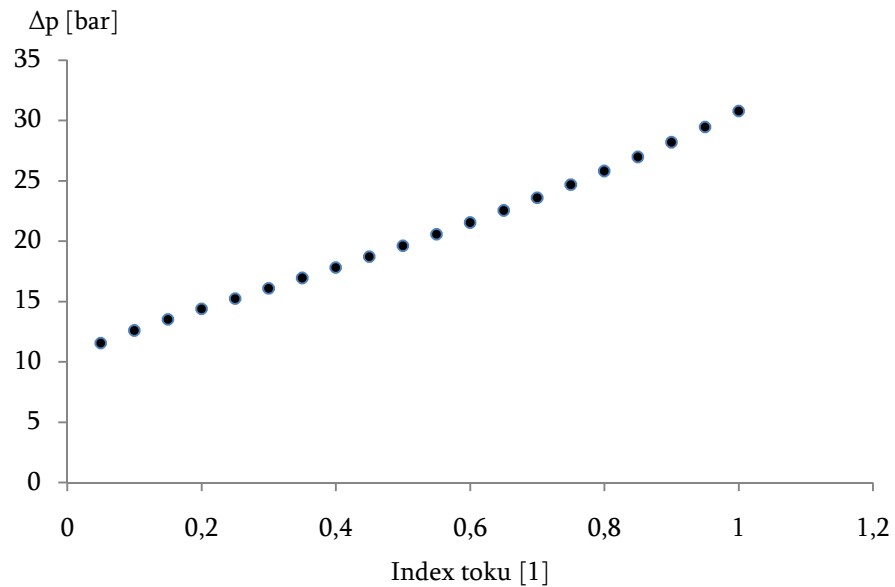
Vypočtená hodnota Reynoldsova čísla je několikanásobně menší než kritická hodnota, která určuje hranici mezi prouděním laminárním a turbulentním. $\text{Re}_{\text{KRIT}} = 2320$. Proto můžeme použít pro výpočet tlakové ztráty zmíněnou zjednodušenou rovnici. Dále díky této skutečnosti můžeme předpokládat, že tlakové ztráty třením budou mnohonásobně vyšší než ztráty lokální. Při takovémto proudění převládají síly vazké nad setrvačnými, a tak se při tomto zjednodušeném výpočtu nemusíme zabývat ztrátami vlivem změn geometrie potrubí či přítomností různých armatur.

$$\Delta p = \frac{2 \cdot 1250 \cdot 10}{0,025} \left[3,775 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{3 + \frac{1}{0,28}}{\pi \cdot 0,025^3} \right]^{0,28}$$

$$\Delta p = 1\,573\,424 \text{ Pa} = 15,73 \text{ bar}$$

Hodnota indexu toku je sama o sobě zajímavá. Charakterizuje, jak je látka schopna téct. Nabývá hodnot dle intervalu $m \in (0; 1 >$.

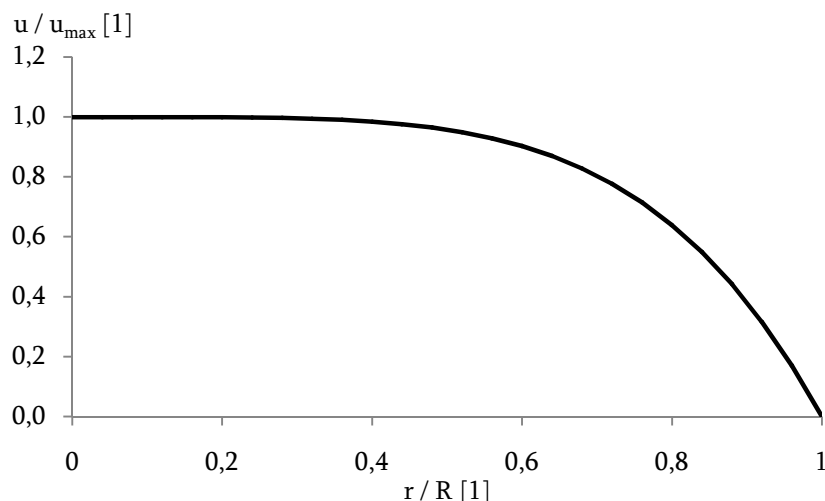
Níže uvedená závislost tlakové ztráty na indexu toku, kde index toku uvažujeme jako proměnnou, ukazuje, že čím je index toku větší, roste tlaková ztráta.



Obrázek 9 - Závislost tlakové ztráty na proměnlivém indexu toku

Z analytického hlediska nás dále může zajímat tvar rychlostního profilu v zadaném potrubí. Pro jeho výpočet lze využít rovnice, kde jako v předchozí uvažujeme všechny důležité veličiny, které popisují mocninnou látku [4].

$$u = \left(\frac{m}{m+1}\right) \cdot \left(\frac{\Delta p}{2 \cdot L \cdot k}\right)^{\frac{1}{m}} \cdot R^{\frac{m+1}{m}} \cdot \left(1 - \left(\frac{r}{R}\right)^{m+\frac{1}{m}}\right) \quad 4.1-3$$



Obrázek 10 - Rychlostní profil proudění kolagenu pro zadané parametry v poměrných souřadnicích

Z doposud získaných hodnot jsme schopni spočítat hodnotu zdánlivé viskozity, díky čemuž už budeme znát všechny potřebné veličiny pro selekci vhodného čerpadla a parametry jeho pracovního bodu.

Abychom mohli spočítat hodnotu zdánlivé viskozity, potřebuju nejprve získat hodnotu smykové rychlosti a hodnotu napětí na stěně trubky [2].

$$\dot{\gamma}_w = \frac{Q}{\pi \cdot R^3} \cdot \left[3 + \frac{1}{m} \right] \quad 4.4-4$$

Po dosazení:

$$\dot{\gamma}_w = \frac{3,775 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot 0,025^3} \cdot \left[3 + \frac{1}{0,28} \right]$$

$$\dot{\gamma}_w = 5,054 \text{ s}^{-1}$$

Výpočet napětí na stěně potrubí:

$$\tau_w = \frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot L} \quad 4.1-5$$

$$\tau_w = \frac{1\,573\,424 \cdot 0,025}{2 \cdot 10}$$

$$\tau_w = 1966,78 \text{ Pa}$$

Hodnotu zdánlivé viskozity získáme jako podíl napětí na stěně a rychlost změny deformace:

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad 4.1-6$$

Dosadíme již spočítané hodnoty:

$$\eta = \frac{1966,78}{5,054}$$

$$\eta = 389,15 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Rozdíl chování několika látek na základě odlišných hodnot tlakových ztrát, rychlosti změny deformace a napětí na stěně můžeme vidět v tabulce níže. Hodnoty v tabulce níže byly vypočteny pro zadaný konstantní průtok a průměr potrubí.

Název látky	Hustota [kg/m ³]	Index toku [1]	Koeficient konzistence [Pa.s ⁿ]	Tlaková ztráta [bar]	Rychlost změny deformace [s ⁻¹]	Napětí na stěně [N. mm ⁻²]
Kolagen	883	0,28	1250	15,7	5,05	1966,78
Voda	1000	1	1*	0,025	3,07	3,125
Med	1417	1	10*	0,246	2,38	30,75
Mleté kuřecí maso	1120	0,1	900	9,06	9,99	1132,5
Burákové máslo	1082	0,07	500	4,8	13,29	600

Tabulka 3 - Analýza reologie různých látek

*pozn.: Jelikož med a voda patří mezi newtonovské látky, uvažujeme namísto hodnoty koeficientu konzistence hodnotu dynamické viskozity.

4.2 Selekce čerpadla

V předchozí podkapitole jsme získali všechny hodnoty pro selekci vhodného čerpadla de facto jeho pracovní bod. V současné době většina dodavatelů čerpací techniky používá pro výběr čerpadel selekční software, do nějž se dosadí hodnoty pracovního bodu a program vybere nejvhodnější stroj včetně potřebných vstupních otáček a krouticího momentu, který musí poskytnout pohon.

Mezi přední výrobce čerpadel s rotačními písty patří americká společnost Waukesha. Vstupní parametry jejich selekčního softwaru jsou: požadovaný průtok, tlaková ztráta, viskozita a teplota média. Po zadání těchto hodnot dostáváme vhodný typ čerpadla, otáčky a krouticí moment v pracovním bodě. Program navíc umí zkontrolovat kavitační odolnost.

4.2.1 Technická specifikace čerpadla

Bylo vyselektováno čerpadlo Waukesha U2 030. Tento typ pumpy patří k těm menším, které tento výrobce poskytuje a to kvůli nízké hodnotě zadaného objemového průtoku. Nicméně si dokáže poradit s relativně velkou tlakovou ztrátou a ve zjištěném pracovním bodě disponuje vysokou kavitační odolností [10].

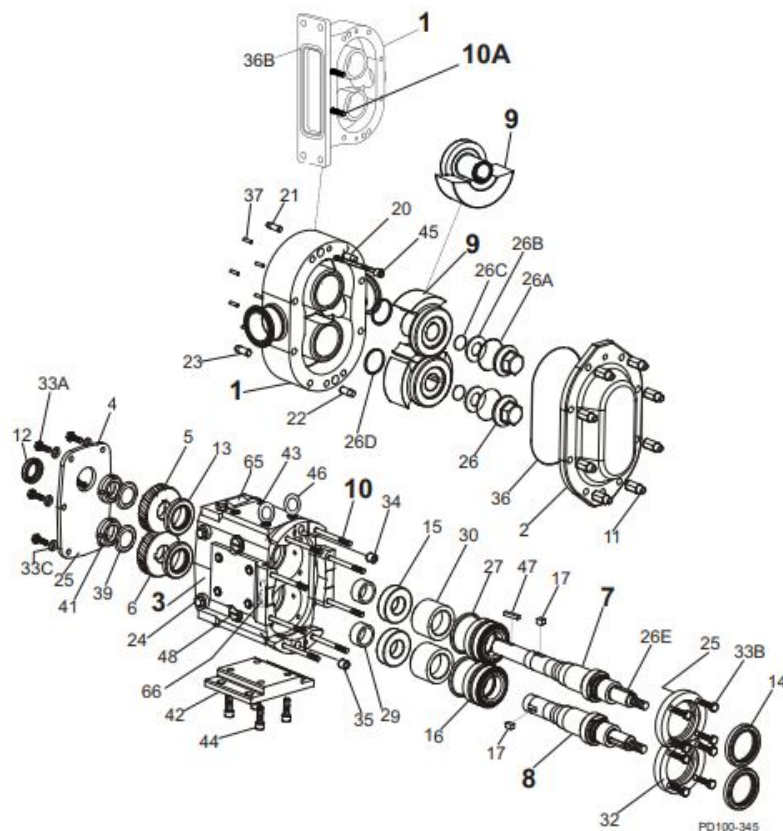
Maximální průtok: 8,2 m³/h

Průtok na otáčku: 0,277 l/ot

Maximální tlak: 17,5 bar

Maximální přípustné otáčky: 600 rpm [10]

Ze známých parametrů je vidět, že čerpadlo se vzhledem k maximálnímu možnému tlaku pohybuje na hraně použitelnosti. V případě potřeby čerpadlo však vyhoví i mírnému zvýšení průtoku. Pokud se objemový průtok zvýší o 10%, tak výsledná tlaková ztráta bude mít hodnotu 16,2 bar.



Obrázek 11 - Rozstřelený pohled na čerpadlo [10]

4.2.2 Kontrola oteplení čerpaného média

Kolagen je termolabilní a se zvýšením teploty dochází k jeho degradaci, respektive přeměně na želatinu. Proto je nutné zkontrolovat, zdali v čerpadle nedojde vlivem disipace přivedeného výkonu k oteplení čerpaného kolagenu. Pro výpočet použijeme jednoduchou kalorimetrickou rovnici. Abychom ji mohli použít, potřebujeme znát celkovou disipovanou energii a hodnotu měrné tepelné kapacity.

Disipovanou energii zjistíme pomocí hodnot přivedeného výkonu na hřídel pumpy a účinnosti čerpadla. Výrobci pump s rotačními písty uvádějí účinnosti v rozmezí od 90 % do 95%. Pro náš výpočet, použijeme hodnotu menší.

Měrná tepelná kapacita kolagenu se dá vypočítat polynomičnou parametrickou rovnicí, kde výsledná měrná kapacita závisí na teplotě. My budeme uvažovat, že čerpaný kolagen bude mít teplotu 15°C [11].

$$c_p = 3,6019 + 2,7753 \cdot 10^{-2} \cdot T - 2,3825 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 7,9661 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 - 8,3219 \cdot 10^{-7} \cdot T^4 \quad 4.2-1$$

Po dosazení teploty a převodu jednotek do základní soustavy získáme

$$c_p = 3708,86 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

Přivedený výkon na hřídel je 5,5 kW a účinnost čerpadla 90% [17]. Disipovanou energii získáme:

$$Q = P - P \cdot \eta_{\text{úč}} \quad 4.2-2$$

$$Q = 5500 - 5500 \cdot 0,9 = 550 \text{ W} = 550 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$$

Nyní můžeme dokončit výpočet dosazením známých hodnot do kalorimetrické rovnice:

$$\Delta T = \frac{Q}{c_p \cdot m} \quad 4.2-3$$

$$\Delta T = \frac{550}{3708,86 \cdot 0,033}$$

$$\Delta T = 4,49 \text{ °C}$$

Vzhledem k tomu, že se čerpaný kolagen oteplí pouze o 4,5 °C a začíná degradovat až při 32 °C [20], nemusíme použít chlazenou hlavu čerpadla. Při výpočtu uvažujeme, že veškeré teplo se bude akumulovat v médiu. Ve skutečnosti se část energie akumuluje i do čerpadla a jeho dílčích součástí (těla, ucpávky, hřídele rotoru). Náš předpoklad je tudíž na straně bezpečnosti.

4.3 Shrnutí provozních parametrů čerpadla

Na základě literární rešerše byly nalezeny příslušné vztahy pro výpočet tlakové ztráty v kruhovém potrubí při proudění látky, jejíž chování lze popsat mocninovým modelem. Tlaková ztráta pro zadaný průtok $3,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ a konstanty reologické modelu $m = 0,28$,

$K = 1250 \text{ Pa}\cdot\text{s}^m$ byl stanoven na hodnotu 15,7 barů. Dále byla provedena analýza toku mocninové kapaliny. Byla nalezena zdánlivá viskozita pro tyto zadané parametry 389,15 Pa.s. Pro tyto operační parametry bylo zvoleno čerpadlo Waukesha U2 030. Vzhledem k tomu, že kolagenní hmota je termolabilní materiál, byl proces transportu hmoty analyzován i z hlediska disipace mechanické energie a oteplení hmoty. Z analýzy vyplývá, že sice dojde k oteplení kolagenu, ale jen k bezpečnému zvýšení teploty, kde nehrozí degradace kolagenu.

5 Konstrukce sestavy čerpadla

5.1 Základní konstrukční požadavky pro zařízení v hygienicky náročném provozu

Potravinářské provozy jsou, jak je obecně známo, velice náročné na hygienu, jen aby nedošlo ke kontaminaci vyráběných potravin. Jsou tak kladeny poměrně náročné požadavky na konstrukci strojů, které se v těchto výroбах používají. Tyto požadavky konkrétně řeší normy EN 1672-2:2005+A1:2009 a ISO 14159:2002. Souhrn těchto dvou norem můžeme najít v dokumentech vydané společností EHEDGE a slouží jako návod pro správnou konstrukci a používání zařízení v provozech, kde je kladen důraz na hygienu [6].

5.1.1 Doporučené materiály

Použité materiály v potravinářském průmyslu by měly splňovat následující požadavky. Musí jít o materiály v první řadě netoxické, které ze svého povrchu neuvolňují látky, jež by mohly znehodnotit zpracovávanou surovinu. Dále by tyto materiály neměly být schopny absorbovat látky, jež ulpí na jejich povrchu. Mohlo by tak dojít k množení mikroorganismů. Materiály by měly kromě toho být dostatečně tvrdé a houževnaté, aby do čerpaného média / potraviny neuvolnili své kovové špony nebo kovové částice z povrchů. To by se mohlo stát například vlivem abraze či adheze. Logicky se nabízí, že nejvhodnější kovový materiál pro použití v tomto odvětví je nerezová ocel.

Některé z parametrů splňují i plasty. Jejich výhodou je například nižší hmotnost nebo netečnost vůči kyselinám. Nicméně nejsou tak pevné a odolné jako zmíněná nerezová ocel.

Těsnicí součásti bývají vyrobeny z různých typů elastomerů. Také ty podléhají požadavkům potravinářství. Musejí být opět inertní, nesmí se drolit a hlavně by se měly dodržovat pokyny výrobce s ohledem na dobu trvanlivosti. Můžeme uvést například elastomer FKM (někdy známý pod obchodní značkou Viton) [6].

5.1.2 Konstrukce a svařování

Dalším požadavkem je, aby byl minimalizován počet rovných ploch. To je z důvodu čistitelnosti, aby veškerá špína při opláchnutí volně стекла ze stroje a nikde neulpívala voda, což by mohlo opět vést k riziku, že se v daném místě začnou množit mikroorganismy. Proto se například nosné základové rámy velmi často svařují například z trubkových profilů a rozvaděčové skříně mají zkosenou horní stěnu. Povrchy by dále měly mít drsnost maximálně Ra 0,8, opět kvůli snadnému stékání médií. Při konstrukci bychom se dále měli vyvarovat odhaleným závitům.

Velké požadavky jsou kladeny na svary. Ty musí být bez jakýchkoliv vnějších i vnitřních imperfekt, kde by mohlo médium ulpívat. Dost často se tedy hotové svary ještě přebroušují nebo leští [6].

5.2 Další použité komponenty

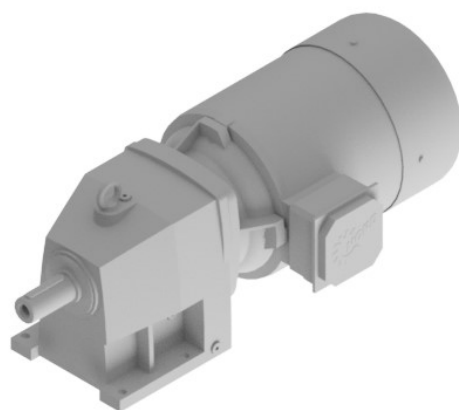
5.2.1 Pohon čerpadla

Pro pohon čerpadla byl vzhledem jeho nízkým otáčkám v pracovním bodě vybrán převodový motor. V současnosti nabízí celou řadu různých typů převodovek několik výrobců. Byla použita převodovka značky NORD.

Technické parametry:

Výkon	5,5 kW
Výstupní otáčky	35 ot/min
Krouticí moment:	180 Nm
Třída účinnosti:	IE3
Třída krytí:	IP55
Hmotnost:	90 kg [13]

Kvůli pohodlnému řízení celého procesu je převodový motor připojen k frekvenčnímu měniči. Ten může být přimontován rovnou ke svorkovnici nebo v rozvaděčové skříně spolu s dalšími ovládacími prvky, PLC atp.



Obrázek 12 - Převodový motor

5.2.2 Hřídelová spojka

Hřídelová spojka zajišťuje přenos krouticího momentu z převodovky na čerpadlo. V této soustavě byla použita standardní hřídelová spojka KTR Rotex R38 64 Sh-D s pružným plastovým elementem. Tento typ spojky je schopný přenést krouticí moment až 405 Nm.

Spojka je radiálně zajištěna pery. Axiálně se může pojistit buď nalisováním, nebo stavěcím šroubem.

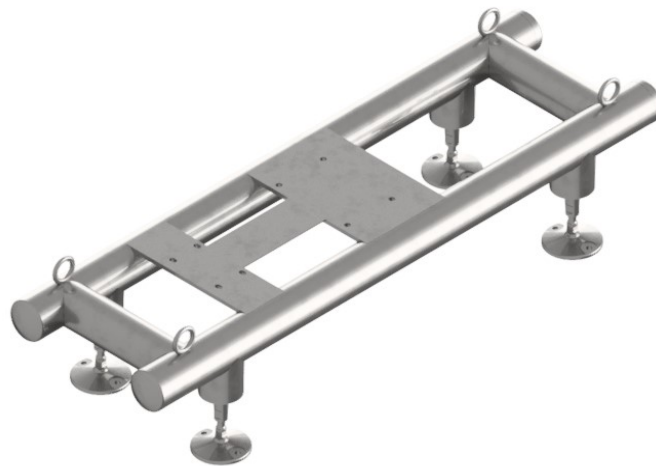
5.2.3 Základový rám a jeho dílčí součásti

Základový rám je svařen z trubkových profilů z nerezové oceli. Kvůli hygienickým požadavkům nemohou být použity čtvercové či obdélníkové profily, což činí větší nároky na svařecí techniky.

Mezi dvě nejdelší trubky, které jsou navíc na svých koncích zaslepeny víčky, jsou vyvařeny dva plechové výpalky o tloušťce 8 mm, které budou sloužit jako kotevní prostor pro čerpadlo a převodový motor. Mezi těmito dvěma výpalky bude vyvařen dvoumilimetrový plech, na nějž se přišroubuje kryt hřídelové spojky.

Aby bylo možné co nejnázáze k rámu přimontovat stavěcí nohy, bude ve čtveřici vertikálně umístěných trubek vyvařena vložka z desetimilimetrového plechu, v jejímž středu bude vyřezán závit, kam se budou moci stavěcí nohy přišroubovat.

Pro snadnou manipulaci jsou k rámu přivařena čtveřice nosných ok.



Obrázek 13 - Základový rám

5.3 Pevnostní kontrola

Je nutné, jednak z důvodu montáže, ale primárně samotné funkce sestavy, aby hřídele převodového motoru a čerpadla byly souosé. Příliš velký průhyb podpurných plechů mezi trubkovými profily může zapříčinit nesouosost a v budoucnu by mohla být příčinou havárie soustrojí nebo by mohlo dojít k příliš rychlému opotřebení ložisek a ucpávek. Proto je nutné provést základní pevnostní výpočet. Pro naše potřeby stačí statický výpočet, který poskytne rozhraní modelovacího softwaru Autodesk Inventor.

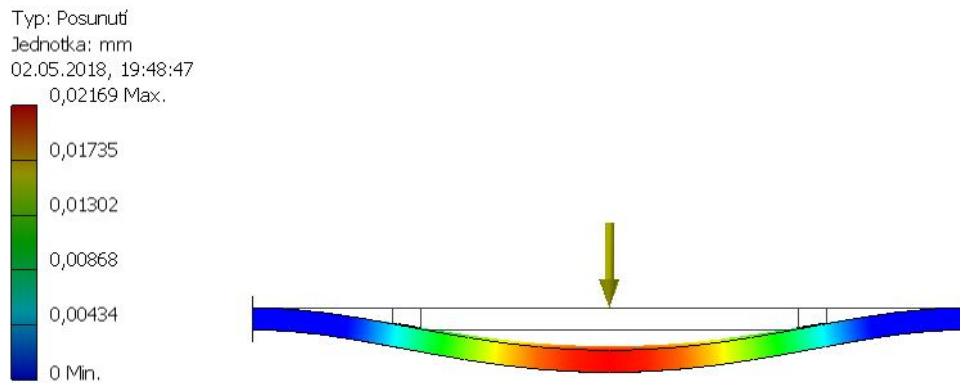
Kontrolu provedeme na dvou místech – plech pod převodovkou a plech pod čerpadlem. Vstupními daty pro tento výpočet jsou hmotnosti komponent, rozměry plechových podpor, jejich materiál a geometrické uspořádání.

5.3.1 Kontrola průhybu pod převodovkou

Zatížení: 900 N (1800 N při zatížení člověkem)

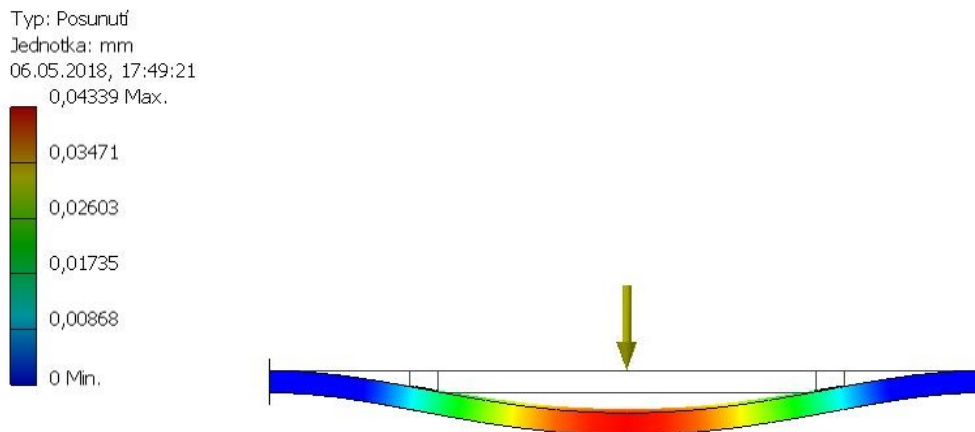
Rozměry plechu: 8x215x325 mm

Materiál: Nerezová ocel AISI 316



Obrázek 14 - Průhyb desky pod převodovkou při běžném zatížení

Dále nasimulujeme, kdyby si na převodový motor stoupl člověk vážící 90 kg. Tato situace by mohla nastat například při montáži.



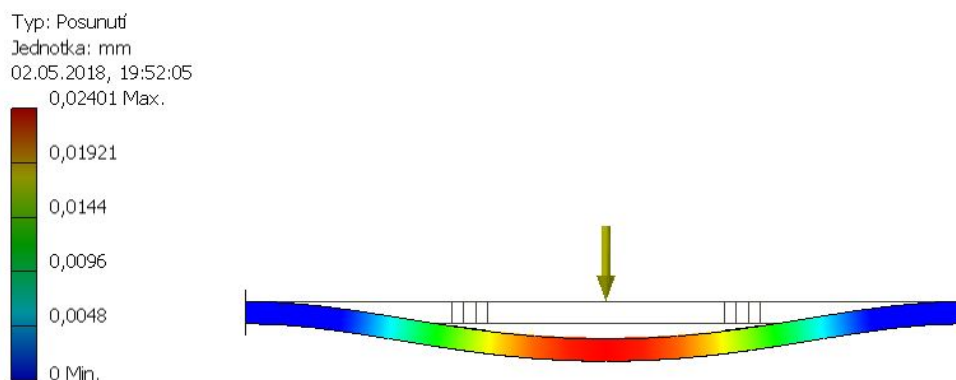
Obrázek 15 - Průhyb desky pod převodovkou při zatížení člověkem

5.3.2 Kontrola průhybu pod čerpadlem

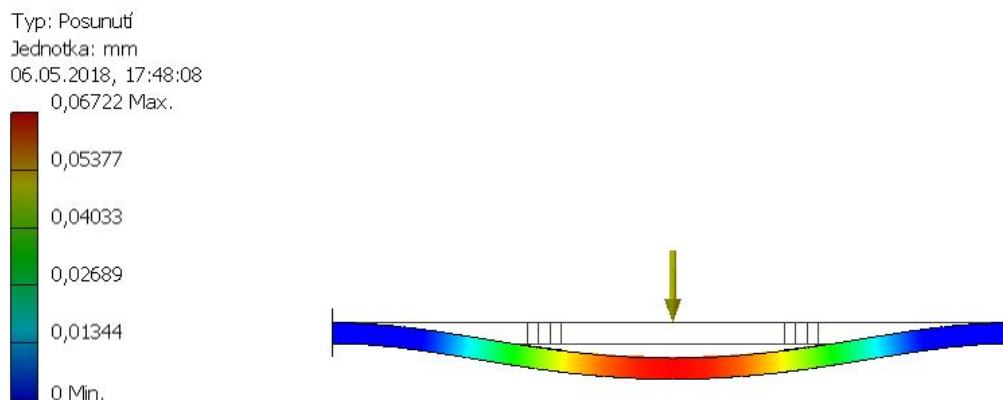
Zatížení: 500 N (1400 N při zatížení člověkem)

Rozměry plechu: 8x105x325 mm

Materiál: Nerezová ocel AISI 316



Obrázek 16 - Průhyb desky pod čerpadlem při běžném zatížení



Obrázek 17 - Průhyb desky pod čerpadlem při zatížení člověkem

Jak vidíme z obrázků výše, tak hodnoty průhybů v nejkritičtějších místě se pohybují v řádech setin milimetru. Proto můžeme konstatovat, že rozměry plechů jsou dostačující.

5.3.3 Kontrola vzpěru stavěcích nohou

Použité stavěcí nohy mohou být díky jejich velké délce nebezpečím, proto je také nutné je zkontrolovat. V jejich případě je nutné ověřit, že nedojde ke ztrátě stability – vzpěru.

Maximální délka nohy při úplném vyšroubování matice	$l_{\max} = 150 \text{ mm}$
Kvadratický moment průřezu	$J = 3215 \text{ mm}^4$
Druh vzpěru	$n = 0,5$
Modul pružnosti v tahu	$E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

Použijeme rovnici pro výpočet kritické síly, kam dosadíme geometrické a materiálové parametry stavěcí nohy [14].

$$F_{\text{KRIT}} = n \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l_{\max}^2} \quad 5.3-1$$

$$F_{\text{KRIT}} = 0,5 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 3215}{150^2}$$

$$F_{\text{KRIT}} = 1184,6 \text{ kN}$$

Hodnota kritické síly, již lze klasifikovat jako vzpěr, vyšla 1184,6 kN. Zatížení jedné nohy je při běžném provozu přibližně 1600 N. Z toho vyplývá, že i při několikanásobném přetížení se nemusíme ztráty stability vzpěrem obávat.

5.4 Montáž, provoz a údržba soustrojí

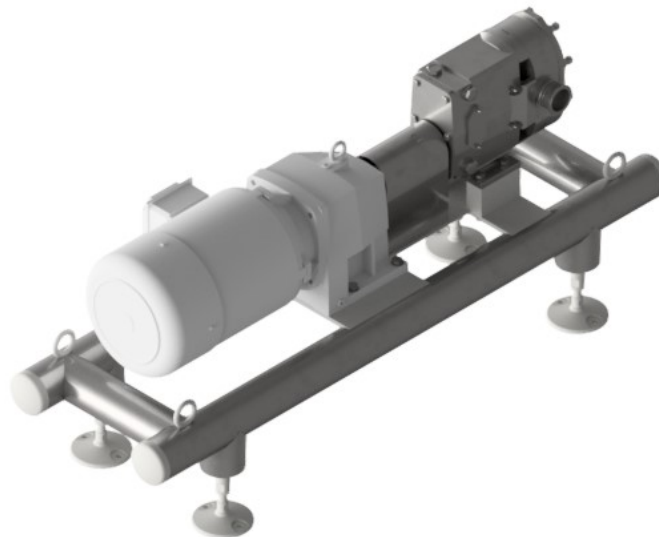
5.4.1 Montáž soustrojí

Při montáži by se mělo postupovat následovně. Nejtěžší komponentou je převodový motor, proto je vhodné ho na základový rám umístit jako první. Kvůli zajištění sousosti hřídelů bude jednodušší manipulovat s čerpadlem, které je o poznání lehčí. Použitý spojovací materiál je z nerezové oceli, která má obecně špatné kluzné vlastnosti. Je tedy nutné použít vazelínu, nanést ji na závity, aby se při utahování nezadřely.

Jakmile budeme mít převodový motor usazený, můžeme na jeho hřídel nasadit jednu část hřídelové spojky. Axiálního pojištění dosáhneme buď nalisovaným spojem nebo použitím stavěcího šroubu.

Nyní je nutné přimontovat čerpadlo. Začneme s přišroubováním nerezových podkladů, abychom dostali hřídele obou strojů do stejné výšky. Druhou polovinu hřídelové spojky nasadíme na čerpadlo. Servisní technik teď musí spojit obě části hřídelové spojky. Pokud by nemohl dosáhnout sousostí, bude nutné například ofrézovat podklady nebo převrtat díry na základovém rámu. Jakmile bude spojka sedět, může za použití šroubů přimontovat čerpadlo k podkladům.

Jako poslední se k rámu přišroubuje kryt hřídelové spojky. Z jeho vnitřní strany jsou k díram přivařeny matice, aby se dal zespuď přišroubovat. Poté se může celá sestava připojit dvojicí clampových portů k potrubnímu systému.

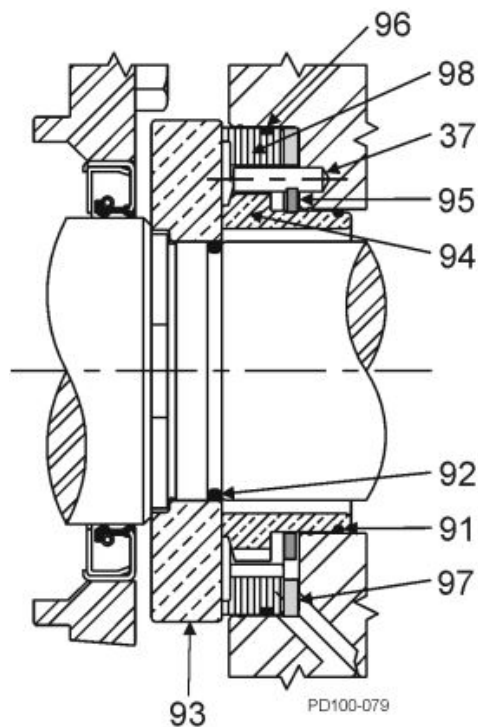


Obrázek 18 - Celá sestava po montáži

5.4.2 Provoz a údržba

Co se týče údržby, tak musíme brát v potaz oblast použití. Tou je v tomto případě potravinářství. Čerpadlo je konstruováno tak, aby obsluze co nejvíce usnadnilo pravidelné čištění. Lze ho připojit na poplachový systém, ve spodní levé části se nachází vstup na poplachovou vodu, vpravo nahoře zase výstup. Kdykoliv to bude potřeba, může se celá komora, kde dochází ke styku média s částí pumpy, vypláchnout. Kromě toho je celá hlava

snadno odnímatelná, a tak se dají veškeré těsnicí komponenty lehce měnit. Mezi základní náhradní díly patří u čerpadel značky Waukesha těsnicí o-kroužky a sestavy ucpávek [10].



Obrázek 19 - Pohled na dvojitou mechanickou ucpávku čerpadla [10]

Mazání ozubeného soukolí v převodovém motoru zajišťuje mazací olej. Zpravidla se v těchto případech musí použít olej určený do potravinářství, který je netoxický, bez obsahu těkavých látek je a snadno biologicky odbouratelný. Mezi takové oleje patří například H1 Ultralube, který je schválen mezinárodní potravinářskou společností NSF.

6 Závěr

Výsledkem této práce je kromě ucelení vlastností kolagenu také postup při návrhu čerpadla a jeho konstrukčních doplňků tak, aby vyhovoval náročným hygienickým požadavkům potravinářského provozu.

Kolagenní hmota, jejíž struktura vizuálně připomíná tuhý gel či těsto, je neneutonská látka, která vykazuje viskoelastické chování. Pro potřeby inženýrského výpočtu je tato látka popsána mocninným modelem, který je charakterizován dvojicí empiricky zjištěných konstant – index toku a koeficient konzistence. Viskoelastická jako taková se při proudění látky projevuje především při změnách geometrie. Existuje několik způsobů, jak toto chování experimentálně měřit. Pokud nás zajímá chování kolagenu při dlouhodobém namáhání, volíme creepový test. Oscilačním testem naopak lépe zjišťujeme chování při změnách v relativně krátkých časových intervalech. Jak již bylo ale zmíněno, oscilační testy se musí provádět na strukturách, které jsou spíše tekuté. Při aplikaci oscilačního testu na kolagen naší koncentrace jsou výsledky těchto měření nepřesné.

Pokud by se pracovní látka považovala pouze za newtonskou, mohlo by dojít k nesprávnému návrhu čerpadla případně neschopnosti rozběhnout výrobu za požadovaných parametrů.

Pro zadané parametry byla vypočítána tlaková ztráta $\Delta p = 15,7$ bar a zdánlivá viskozita $\eta = 389$ Pa.s, spolu s požadovaným průtokem jsou tato data dostačující pro volbu čerpadla. Viskoelastické chování bylo zanedbáno, neboť bylo při výpočtu uvažováno přímé potrubí bez přítomnosti armatur a tvarovek, jejíž složitá geometrie by toto chování iniciovaly. Při selekci bylo bráno v potaz, že čerpadlo bude umístěno v potravinářském provozu. Proto bylo zvoleno čerpadlo s rotačními písty - typ Waukesha U2 030, které svou konstrukcí vyhovuje ve všech ohledech. Tato čerpadla jsou obecně hnána pohony o menších otáčkách. Z toho důvodu bude výkon dodávat převodový motor o výkonu 5,5 kW. Vzhledem k nízkým otáčkám v pracovním bodě bude nutné už tak vysoký převodový poměr doladit použitím frekvenčního měniče.

Čerpací soustrojí bude přimontováno na základový rám, který rovněž splňuje hygienické požadavky. S ohledem na použití byla provedena pevnostní kontrola kritických komponent – průhyb plechových podkladů a kontrola vzpěru stavěcích nohou.

Dále je v této práci uveden doporučený postup montáže a údržby celé čerpací sestavy.

Výsledkem této práce je tudíž ucelený postup při návrhu čerpání pro takřka jakoukoliv látku popsanou mocninným modelem. Nejprve tedy musí proběhnout analýza vlastností látky, její reologické chování a zjištění, zdali je vůbec čerpatelná běžnými čerpadly. Pověštinou se čerpadla připojují k již existující potrubní trase, musíme tedy znát topologii a délku trasy. Poté, co ze zjištěných parametrů ztrátu spočítáme, můžeme přikročit k samotnému návrhu, kde musíme zohlednit i prostředí, kde k čerpání dochází.

7 Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] SHOULDERS, Matthew D. a Ronald T. RAINES. Collagen Structure and Stability. Annual Reviews. Department of Chemistry and Department of Biochemistry, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706, 2009, 2009(4), 33. DOI: 2009.78:929-958.
- [2] FRATZL, Peter. Collagen: structure and mechanics. New York: Springer, 2008. ISBN 978-0-387-73906-9.
- [3] ŠESTÁK, Jiří, Jan PŘIDAL, Jan JESCHKE a Zdenka JANDOŠOVÁ. Reologie a sušina kolagenu pro tažení umělých střev. Praha, 1988. Výzkumná zpráva. Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze.
- [4] BARNES, Howard A. Handbook Of Elementary Rheology. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics University of Wales: Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics University of Wales, 2000. ISBN 0-9538032-0-1.
- [5] CHHABRA, R. P. a J. F. RICHARDSON. Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 07-506-8532-8.
- [6] Hygienic design principles [online]. In: . 2018, s. 13 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <https://www.ehedg.org/guidelines/free-documents/>
- [7] What is Collagen?: THE COLLAGEN MOLECULE [online]. 30.7.2014 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.proto-col.com/blog/2014/07/30/collagen/>
- [8] POMTAVA SA. Products general overview - POMTAVA SA - PDF Catalogue [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://pdf.directindustry.com/pdf/pomtava-sa/products-general-overview/60152-320025.html>
- [9] NOV INDUSTRIAL. EZstrip Transfer Pump Brochure [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.mono-pumps.com/en-uk/webfm_send/3101
- [10] SPX FLOW. Universal II Series: ROTARY POSITIVE DISPLACEMENT PUMP - Instruction Manual [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/95-03015_uni2p_wcb_tcm11-10674.pdf
- [11] ŠTANCL, Jaromír, Rudolf ŽITNÝ, Jan SKOČILAS, Aleš LANDFELD a Milan HOUSKA. Electrical and thermodynamic properties of collagen solution. Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Process Engineering, 6.

- [12] Castle Pumps: Gear pump working principle [online]. 2018 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.castlepumps.com/info-hub/gear-pump-guide>
- [13] Základní katalog převodovek: Konstantní otáčky G1000 [online]. NORD [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: https://www.nord.com/cms/media/documents/bw/G1000_50Hz_IE3_CZ_2317.pdf
- [14] MICHALEC, Jiří a kol. Pružnost a pevnost II. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2001. 215 s. ISBN 80-01-02375-3.
- [15] 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) [cit. 2018-05-15]. ISSN 1745-4603.
- [16] SKOČILAS, J., R. ŽITNÝ, J. ŠTANCL, J. SOLNAŘ, Aleš LANDFELD a Milan HOUŠKA. Flow of bovine collagen in rectangular slit [online]. Faculty of Mechanical Engineering, Technická 4, 166 29 Prague 6, Czech Republic; Food Research Institute Prague, Radiová 7, 102 00 Prague 10, Czech Republic, , 7 [cit. 2018-05-15].
- [17] Power Zone: Positive Displacement Pump Calculations. Power Zone [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.powerzone.com/resources/calculations/pd/brake-horsepower>
- [18] ŠESTÁK, Jiří a František RIEGER. Přenos hybnosti, tepla a hmoty. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 2004. 299 s. ISBN 80-01-02933-6.
- [19] Ústav fyziky a materiálového inženýrství, Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dynamické namáhání viskoelastických látek [online]. In: . s. 6 [cit. 2018-05-20].
- [20] LAI, Guoli, Yang LI a Guoying LI. Effect of concentration and temperature on the rheological behavior of collagen solution. International Journal of Biological Macromolecules [online]. The Key Laboratory of Leather Chemistry and Engineering of Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu 610065, PR China, 2008, (42) [cit. 2018-05-20].

8 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Struktura kolagenu [7]	12
Obrázek 2 - Modely představující viskoelastické chování [4]	13
Obrázek 3 - Závislost deformace na čase při creepovém testu [4]	15
Obrázek 4 - Závislost napětí na čase při relaxačním testu	17
Obrázek 5 - Závislost G' a G'' na frekvenci v logaritmickém měřítku [4]	17
Obrázek 6 - Schéma zubového čerpadla [12]	22
Obrázek 7 - Řez tělem vřetenového čerpadla [9]	22
Obrázek 8 - Čerpadlo s rotačními písty s odejmutou hlavou [10]	23
Obrázek 9 - Závislost tlakové ztráty na proměnlivém indexu toku	27
Obrázek 10 - Rychlostní profil proudění kolagenu pro zadané parametry v poměrných souřadnicích	28
Obrázek 11 - Rozstřelený pohled na čerpadlo [10]	31
Obrázek 12 - Převodový motor	36
Obrázek 13 - Základový rám	37
Obrázek 14 - Průhyb desky pod převodovkou při běžném zatížení	38
Obrázek 15 - Průhyb desky pod převodovkou při zatížení člověkem	38
Obrázek 16 - Průhyb desky pod čerpadlem při běžném zatížení	39
Obrázek 17 - Průhyb desky pod čerpadlem při zatížení člověkem	39
Obrázek 18 - Celá sestava po montáži	41
Obrázek 19 - Pohled na dvojitou mechanickou ucpávku čerpadla [10]	42

9 Seznam tabulek

Tabulka 1 - Naměřená data pro kapilární reometr [15].....	18
Tabulka 2 - Naměřená data v reometru s obdélníkovou štěrbinou [16].....	19
Tabulka 3 - Analýza reologie různých látek	29

10 Seznam příloh

Příloha A – Sestavný výkres čerpací jednotky

Příloha B – Výrobní výkres základového rámu