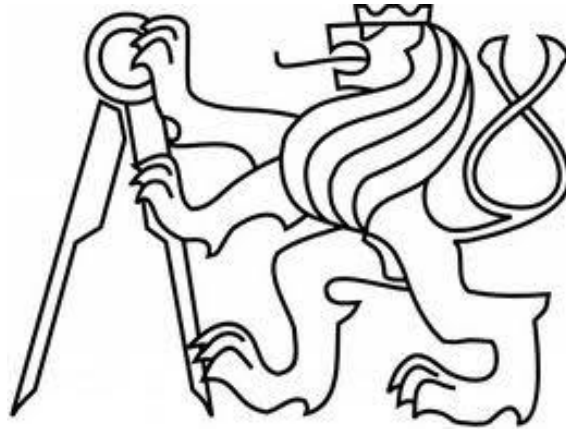


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV PROCESNÍ A ZPRACOVATELSKÉ TECHNIKY



Gely v potravinářském průmyslu

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Houska** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **420515**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací 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:

Gely v potravinářském průmyslu

Název bakalářské práce anglicky:

Gels in Food Industry

Pokyny pro vypracování:

Zaměřte se na popis a definici gelu. Popište jeho základní struktury a varianty. Popište, jaké jsou druhy vazeb v gelu. V literární rešerši se zaměřte na popis fyzikálních vlastností kolagenu a želatiny. Navrhněte parametry čerpadla pro dopravu gelu potrubím pro zadané parametry.

Seznam doporučené literatury:

Brinckmann J., Notbohm H., Müller P.K.: Collagen. Primer in Structure, Processing and Assembly. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2005.
Ramachandran G.N., Reddi A.H.: Biochemistry of Collagen. Springer Science+Business Media New York. 1976

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

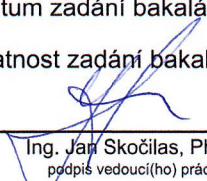
Ing. Jan Skočilas, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS


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


Datum zadání bakalářské práce: **23.10.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.01.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


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


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

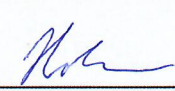

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

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.

30.10.2018

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne

.....

Martin Houska

Anotační list

Jméno autora:	Martin
Příjmení autora:	Houska
Název práce česky:	Gely v potravinářském průmyslu
Název práce anglicky:	Gels in Food Industry
Rozsah práce:	počet stran: 58 počet obrázků: 25 počet tabulek: 8 počet příloh: 0
Akademický rok:	2018/2019
Jazyk práce:	česky
Ústav:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jan Skočilas, Ph.D.
Oponent:	
Konzultant práce:	
Zadavatel:	Ústav procesní a zpracovatelské techniky, FS ČVUT
Klíčová slova:	gel, želatina, potraviny, reologie, suspenze, želatinace
Keywords:	gel, gelatin, food, rheology, suspension, gelation
Využití:	Sumarizace druhů a využití gelů v potravinářském průmyslu, jejich vlastností a chování při čerpání danou soustavou

Anotace česky:

Bakalářská práce je zaměřena na rešerši v oblasti využití gelů v potravinářském průmyslu. V úvodu je zde uvedena definice gelu z více úhlů pohledu. V následujících částech se práce zabývá reologií a jednotlivými příklady gelů, s uvedenými vlastnostmi a využitím. Výpočetní část práce se zaměřuje na čerpání gelovité látky, v našem případě želatiny (kolagenní látky), soustavou čerpadlo-potrubí. Výpočet je doplněn o vhodnou volbu čerpadla dané soustavy.

Abstract:

The bachelor thesis is focused on the literature search in the field of utilization of gels in the food industry. Definitions of gel from multiple point of view are mentioned in the introduction. In the following sections, the thesis deals with rheology and individual examples of gels with their properties and utilization. The computational part of the thesis is focused on the pumping of gel substances, in our case gelatine (collagen substance), by the pump-pipe system. The calculation is supplemented by selection of a suitable pump for the system.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu této práce panu Ing. Janu Skočilasovi, Ph.D. za celkový přístup během vytváření práce. Odborný dohled, cenné rady, a především trpělivost pro mne byly velkou pomocí. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině za umožnění studia a veškerou podporu během něj.

OBSAH

1	ÚVOD.....	9
1.1	Co to je gel?	9
2	REŠERŠE	11
2.1	Definice gelu	11
2.1.1	Definice dle Floryho	11
2.1.2	Definice dle P.W. Atkinse	11
2.1.3	Definice dle Encyklopedie polymerní vědy a inženýrství	11
2.1.4	Definice dle J. Pouchlého a I. Vavruchy	11
2.2	Tvorba a výroba gelu	12
2.2.1	Gelující činidla.....	12
2.2.2	Podmínky vzniku gelu	12
2.3	Typy gelů	20
2.3.1	Hydrogel	20
2.3.2	Organogel.....	20
2.3.3	Xerogel.....	20
2.3.4	Aerogely.....	20
2.3.5	Slabé (nestálé) gely	21
2.3.6	Tekuté gely	21
2.3.7	Tepelně citlivé gely.....	21
2.4	Mechanismus vzniku gelů a jejich obecné vlastnosti	22
2.4.1	Želatina	22
2.4.2	Syrovátkové bílkoviny	22
2.4.3	Sójové bílkoviny	23
2.4.4	Mléčné bílkoviny	23
2.4.5	Vaječné bílkoviny	23
2.4.6	Algináty	23

2.4.7	Pektin	24
2.4.8	Agar	24
2.4.9	Škrob	25
2.4.10	Karagenan	25
2.4.11	Guma gellan	26
2.4.12	Guarová guma	26
2.4.13	Xantanová guma	27
2.4.14	Karobová guma	27
2.5	Reologické vlastnosti gelů	28
2.6	Používané metody pro zjišťování vlastností gelů	31
2.6.1	Oscilační reometrie	33
2.6.2	Experimenty s vytlačovacím reometrem	36
2.7	Dílčí závěry vyplývající z literární rešerše	39
3	VÝPOČET	40
3.1	Zadání	41
3.1.1	Zadané parametry	41
3.2	Schéma soustavy	41
3.3	Vlastní výpočet	42
3.4	Výběr vhodného čerpadla	46
3.4.1	Zubová čerpadla	47
3.4.2	Vřetenová čerpadla	48
3.4.3	Rotační pístová čerpadla	49
3.4.4	Rotační lobe pumpy	50
4	ZÁVĚR	54
5	PŘEHLED POUŽITÉHO ZNAČENÍ	55
6	POUŽITÁ LITERATURA	56

1 ÚVOD

Gely jsou v potravinářském průmyslu hojně využívané látky, proto je musíme studovat, zjišťovat jejich vlastnosti za různých podmínek a tím zpětně zajistit jejich vhodnou implementaci do potravinářských výrobních procesů. Tato práce se zabývá především základním přehledem typů gelů, jejich inženýrských vlastností a použitím v potravinářském průmyslu. Praktická část práce je věnována ukázce návrhového výpočtu čerpadla pro definovaný typ gelu a jeho vlastnosti nalezené v literatuře.

1.1 Co to je gel?

Říci jednoduše co je to gel, není vůbec snadné. V následujících odstavcích textu se pokusíme zachytit podstatu gelu spíše z obecného hlediska. Odbornou definicí gelu se budeme zabývat v následující kapitole.

Základ slova gel pochází z latiny a mnohé nám o samotném gelu vypovídá. Konkrétně latinské slovo gelu znamená mráz, ztuhlost, led. Podobné slovo se stejným základem gelatus znamená zmrazený, nehybný [23]. Obě tato slova zachycují hlavní vlastnost gelu, tedy „ztuhlou“ formu látky. Navenek se gely jeví jako pevné (tuhé nebo polotuhé) látky rosolovitého charakteru. Pružností a zachováním tvaru při menším namáhání připomínají tuhou elastickou látku. Hmotností a objemem se podobají kapalinám, z čehož plyne také jejich podobná hustota, ovšem při soudržnosti struktury pevných látek. Gely, které se sestávají z vysokomolekulárních látek s rozdílným složením látky a rozpouštědla (kapaliny), nazýváme hydrogely. Většina látek, které v běžném životě označíme za gel, jsou právě hydrogely. Nahrazením kapaliny plynem je možné získat aerogel, materiál s výjimečnými vlastnostmi jako velmi nízká hustota, vysoká porosita a velmi nízký součinitel tepelné vodivosti [1].

Ve většině případů lze říci, že gely jsou koloidní (heterogenní) systémy, ve kterých porézní síť vzájemně spojených nanočástic zachytí určitý objem tekutiny. Koloidní systém je takový systém, ve kterém jsou dispergovány neboli rozptýleny částice o velikosti 1 nm až 1000 nm (případně 500 nm). Částice v tomto velikostním rozmezí udělují systému specifické vlastnosti, které jsou typické právě pro gely a které se u částic mimo toto rozmezí nemusí vyskytovat [24].

Mnoho gelů vykazuje tixotropii. Jedná se o vlastnost, kdy gel za působení vnější síly ztrácí svou soudržnost, roztéká se. Při ponechání gelu v klidu se navrací jeho původní

vlastnosti zpět (tuhne, průběh rychlosti deformace na tečném napětí vykazuje hysterezní smyčku). Tento proces je opakovatelný. Tixotropii můžeme nalézt především u slabých gelů, kde jsou vazby tvořeny vodíkovými můstky a elektrostatickými silami [25]. Jednotlivé typy gelů zmíněné v úvodu (hydrogel, aerogel, slabý gel, atd.) budou popsány v textu následujících kapitol.

2 REŠERŠE

2.1 Definice gelu

Jak jsme se přesvědčili v předešlé části práce, definovat jednoznačně gel není vůbec snadným úkolem. Touto problematikou se zabíralo mnoho vědců. Velká část definic si je velmi blízkých, avšak v určitých detailech se liší. Níže si pro srovnání uvedeme jejich přehled.

2.1.1 Definice dle Floryho

Jednou z nejznámějších definic gelových látek je definice dle Floryho. Flory je nositelem Nobelovy ceny v oblasti makromolekulární chemie. Jeho definice platí pro gely polymerů.

Základní specifika polymerního gelu:

- gel má 2 fáze – (kapalná a tuhá látka), obě fáze jsou spojitě (koherentní),
- chemická odlišnost obou fází (například želatina a voda),
- koloidní stupeň disperzity (malý rozpor mezi 1. bodem – koloidy jsou v některých vlastnostech heterogenní – to neodporuje, ale v jiných homogenní – to odporuje) [17].

2.1.2 Definice dle P.W. Atkinse

Jedná se o další, dnes velmi využívanou definici gelu.

„Gel je polotuhá hmota, která vznikla proniknutím všech molekul disperzního prostředí do částic lyofilního sólu“ (sol gel – koloidní suspenze) [17].

2.1.3 Definice dle Encyklopedie polymerní vědy a inženýrství

„Gel je zesíťovaná, v kapalném prostředí nabobtnalá polymerní síť. Její vlastnosti silně závisí na vzájemné interakci těchto dvou součástí“ [17].

2.1.4 Definice dle J. Pouchlého a I. Vavruchy

„Gel je disperzní soustava tvořena spojitým disperzním prostředím proniknutým spojitou dispergovanou fází“ [17].

Z výše fyzikálně chemického popisu gelu lze snad pohledem technika popsat gel jako polotuhou (polotekutou) látku obsahující nejméně dvě složky, z nichž pevná složka tvoří síť z dlouhých zapletených makromolekul a tekutá (kapalina, plyn) složka je v této síti chycena.

2.2 Tvorba a výroba gelu

Následující část práce je převzata z odborného článku [1] typu review, který se kromě jiných podařilo během literární rešerše nalézt s použitím dostupných elektronických zdrojů. Zdroj byl použit jako stěžejní pro literární rešerši této práce z důvodu své vysoké kvality a komplexnosti obsahu. Jsou zde uvedeny a velmi přehledně členěny veškeré podstatné informace k tématu: Gely v potravinářském průmyslu. Pokud jsou použity i jiné zdroje informací, v textu jsou přehledně označeny.

K výrobě gelů se využívá více druhů gelujících činidel. V následující části práce se zaměříme na nejpoužívanější z nich a popíšeme princip vzniku gelů. Obecně lze říci, že máme dva základní druhy gelujících činidel.

Do první skupiny můžeme zařadit činidla, která způsobují zgelovatění fyzikálním působením, pro příklad lze uvést teplotu a tlak. Druhá skupina je tvořena činidly, která způsobují zgelovatění látky pomocí chemických procesů, za příklad lze uvést změnu pH a působení enzymů. Cílem práce je popis gelů a jejich užití v potravinářském průmyslu, proto v následujícím textu budou informace orientované hlavně na potravinářský průmysl, ačkoliv se gely hojně používají jak v chemickém, spotřebním, či farmaceutickém průmyslu.

2.2.1 Gelující činidla

Gelující činidla jsou látky (potravinářské přísady) používané jako zahušťovadla a stabilizátory v mnoha druzích potravin (želé, zákusky, bonbóny). Pomocí těchto přísad je dosahováno zlepšení struktury a konzistence potraviny za vzniku gelu.

2.2.2 Podmínky vzniku gelu

Tvorba gelu je spontánní proces z jednoduché polymerní disperze nebo suspenze částic za působení kontrolovaných vnějších podmínek, jako je teplota nebo složení roztoku. Proces přeměny roztok-gel obvykle zahrnuje shlukování částic nebo makromolekul s případnou tvorbou sítě v celém objemu gelu. Tvorba gelů může být klasifikována buď jako fyzikálně indukovaná (teplota, tlak), nebo jako chemicky indukovaná (změna PH, působení iontů, enzymů). V případě bílkovinných gelů vyžaduje tvorba gelu hnací sílu k rozvinutí přirozené bílkovinné struktury. Následuje proces seskupování, při němž se tvoří trojrozměrná uspořádaná síť. Ta se sestává ze shluků nebo vláken molekul, které jsou křížově spojeny nekovalentními vazbami, méně často

i vazbami kovalentními. Podmínky, které nejčastěji ovlivňují tvorbu gelů jsou uvedeny v následujících oddílech.

2.2.2.1 Teplota

Tepelně podmíněné gelovatění je zřejmě nejběžnější a nejdůležitější metodou získávání gelu. Jedná se o dvoustupňový proces, kdy nejdříve dochází k uvolnění nebo disociaci molekul zapříčiněné dodáním energie. V druhém kroku dochází k sdružování a formování uvolněných molekul za vzniku komplexů s vyšší molekulární hmotností. První krok může být vratný, zatímco druhý bývá ve většině případů procesem nevratným. V tomto hrají hlavní roli zřejmě disulfidové můstky a hydrofobní interakce v látce. Při tvorbě gelu je nutné rozlišit mezi teplotou tuhnutí (někdy také označovanou jako teplotu gelanitizace), při které koloidní roztok tuhne v gel a teplotu ztekucení, při které gel přechází v sol, kde teplota tuhnutí je nižší než teplota ztekucení.

2.2.2.2 Tlak

Zvyšování tlaku rozšiřuje možnosti pro modifikaci funkčních vlastností molekul. Může být aplikován samostatně nebo v kombinaci s jinými procesy, zejména se zvyšováním teploty. Obecně platí, že zvýšení tlaku podporuje reakce, které vedou ke snížení celkového objemu systému. Tlak způsobuje vylučování vody ze systému a pH se pod tlakem stává kyselejší. Existují rozdíly ve vzhledu a reologických vlastnostech gelů vyrobených účinky tlaku nebo tepla.

2.2.2.3 Iontové působení

Jednomocné a dvojmocné kationty, jakými jsou sodík a vápník, mohou pomoci zvýšit iontovou soudržnost gelu. Elektrostatické odpudivé síly mezi molekulami gelu jsou redukovány nebo neutralizovány a může dojít k tvorbě gelu. Vznik gelu za přítomnosti iontů byl zaznamenán u předem denaturované syrovátkové bílkoviny. Vzhledem k tomu, že tento proces neprobíhá za zvýšené teploty (na rozdíl od procesu vniku želatiny), je tvorba gelu touto cestou označována jako studená. Tvorba gelu za přítomnosti iontů je významná pro polysacharidové gely, například alginát, pektin nebo karagenan.

2.2.2.4 pH

Změny pH způsobené přidáním kyselin nebo mikrobiální fermentací způsobují změnu náboje molekuly, v důsledku toho se mění přitažlivé a odpuzující síly mezi molekulami. Ovlivněna je také interakce mezi molekulami a rozpouštědly, tj.

hydratačními vlastnostmi. Se změnou pH se mění rozpustnost solí, což může přispět k tvorbě gelu. Mechanismus tvorby kyselého gelu lze vysvětlit teorií fraktální agregace.

2.2.2.5 Působení enzymů

Enzymy indukované gelovatění je založeno na zavedení umělých kovalentních křížových vazeb do potravinových bílkovin. Reakce katalyzované transglutaminázou (TG), peroxidázou a polyfenol oxidázou jsou vhodné pro tvorbu sítí u gelů tvořených bílkovinami.

2.2.2.6 Druh rozpouštědla

Druh a přítomnost rozpouštědla výrazně ovlivňují tvorbu gelu, například koncentrovaný cukerný roztok je špatným rozpouštědlem pro pektin. Vodíkové vazby ve spojovacích zónách mohou být vytvořeny pouze v koncentrovaném cukerném roztoku, a proto se gely typické pro vodíkové typy vazeb vyrábějí pouze v koncentrovaném cukerném roztoku.

2.2.2.7 Koncentrace (množství) gelujícího činidla

K tvorbě gelu dochází pouze nad kritickou minimální koncentrací C^* , která je specifická pro každý hydrokoloid. Agaróza bude vytvářet gely při nízkých koncentracích (0,2%), zatímco škrob ředěný kyselinou vyžaduje koncentraci 15% pro vytvoření gelu.

2.2.2.8 Molární hmotnost/Stupeň polymerizace

V případě, že je koncentrace polymeru výrazně nad kritickou minimální koncentrací, účinek molární hmotnosti je nevýznamný. Pokud se koncentrace nachází v blízkosti okolo hodnot C^* , platí, čím vyšší je molární hmotnost, tím proces tvorby gelu probíhá rychleji.

2.2.2.9 Přehled gelujících činidel

Ve dvou přehledných tabulkách jsou uvedena základní gelující činidla. Tabulka 1 obsahuje činidla sacharidové povahy, v Tabulce 2 jsou zmíněna činidla povahy bílkovinné.

Tabulka 1 – Hydrokoloidy používané jako gelující činidla [1]

Gelující činidlo	Původ suroviny	Druh vazby	Využití
Agar	Červené řasy (<i>Gelidium sp. a Gracilaria sp.</i>) nebo mořské řasy (<i>Sphaerococcus euchema</i>)	Agaropektin a agarosa (D-galaktosa a L-anhydrogalaktosa)	Projímadlo, náhrada želatiny pro vegetariány, do želé a japonských dezertů (anmitsu)
Obilné Mouky a škroby (vařené, instantní, modifikované)	Brambory, pšenice, rýže, kukuřice, tapioka	D- α , 1-4, 1-6 vázaný glukózový polymer, tvořen amylázou (lineární) a amylopektinem (rozvětvený)	Doplňkové gelující činidlo, cenově výhodné, gely tvořené rýžovou moukou
Celulóza (běžné formy jsou carboxymethyl-celulosa)	Rostlinné buněčné stěny a jejich chemické modifikace	Homo-polymer β (1-4) D-glukosy	Salátové dresinky a dezerty
Karagenan (kappa, iota, lambda, hybridní, smíšený, rafinovaný)	Červené mořské řasy (<i>Chondrus crispus</i>)	Sulfátová D-galaktosa a L-anhydrolaktosa	Dezerty, gel k znehybnění buněk a enzymů
Pektin (high-methoxyl, HM a low-methoxyl, LM)	Hetero polysacharid odvozený z buněčných stěn vyšších rostlin a ovoce (citronová kůra, guava, jablko)	Lineární polymer částečně esterifikované α - (1-4) -spojené D-galakturonové a mannuronové kyseliny. Někdy je kyselina galakturonová nahrazena ramnózou,	Džemy, želé, marmelády, jogurty

		galaktózou a arabinózou	
Guarová guma	Endosperm z guarové gummy	Lineární řetězec galactomanozo-vých jednotek	Plnidlo do těstovin, jogurty, tekuté sýrové produkty, dezerty, sportovní výživa
Arabská guma	Míza ze dvou druhů stromu akácie (<i>Acacia senegal</i> , <i>Acacia seyal</i>)	Komplexní směs sacharidů a glykoproteinů	Tvrdé gumové a čokoládové bonbony, žvýkačky
Xantanová guma	Fermentovaná glukóza nebo sacharóza pomocí kvasinek rodu <i>Xanthomonas campestris</i>	Polysacharidový řetězec sestávající ze dvou β -D-glukozových jednotek propojených na 1,4 pozici. Boční řetězec se skládá ze dvou manos a jedné kyseliny glukuronové, a tudíž se řetězec skládá z opakujících se modulů, tvořených 5 sacharidovými jednotkami	Salátové dresinky a omáčky, pomáhá stabilizovat olej a pevné složky proti oddělování. emulgátor a změna textury v mnoha jídlech.
Karobová guma	Extrakt ze semen Karobového stromu	Jedná se o galaktomanan	Gelující činidlo
Alginát (kyselina alginová)	Hnědé mořské řasy (<i>Macrocystis pyrifera</i> , <i>ascophyllum</i>)	Lineární kopolymer s bloky (1-4) -spojeného β -D-mannuronátu a jeho C-5 epimerů α -L-guluronátových	Želé, gely s divalentními kationty, obalení a znehybnění buněk, potlačení chuti k jídlu

	<i>nodosum</i> a různé druhy <i>Laminaria</i>)	zbytků kovalentně spojených v různých sekvencích	
Konjac mannan	Hlízy Konjaku (<i>Lasioideae amorpho-phallus</i>)	Glukomannan je heteropoly-sacharid složený z D-glukózy (G) a D-manózy (M). Spojení β -D-1,4 vazba. Poměr G/M je 1:1,6.	Gelující, vodu vázající činidlo schopné měnit strukturu. Náhrada tuku do nízkotučných uzenin.
Guma Karaya	Extrakt ze stromu <i>Sterculia</i>	Acetylovaný kyselý polysacharid, obsahující kyselinu α -D-galakturonovou a zbytky α -L-ramnose, které tvoří hlavní řetězce a kyselinu napojenou s 1,2 vazbou β -D-galaktosy nebo s 1,3 vazbou β -D-glukuronové kyseliny na postranních řetězech	Hnědé omáčky, polevy náplně
Tragakantová guma	Sušená šťáva několika druhů luštěnin rodu (<i>Astragalus</i> , včetně <i>A. adscendens</i> , <i>A. gummifer</i> a <i>A. tragacanthus</i>)	Skládá se ze dvou frakcí: ve vodě rozpustný neutrální arabinogalaktan nazývaný tragakantin a nerozpustná frakce zvaná kyselina tragakantová	Cukrářské polevy, dresinky

Tabulka 2 – Bílkoviny používané jako gelující činidla [1]

Gelující činidlo	Původ suroviny	Druh vazby	Využití
Želatina (kyselá, zásaditá)	Zvířecí kůže a kosti (získaná částečnou hydrolyzou kolagenu pojivových tkání)	Bílkovina s vysokým obsahem glycinu a prolinu	Gelující činidlo v želatinových dezertech, želé, cukrovinky, džemy, jogurty, smetanové sýry, margaríny
Syrovátkový protein	Kyselá nebo sladká mléčná syrovátka	Většinou složen z globulárních proteinů (β -laktoglobulin a α -laktalbumin)	Gelující činidlo a zahušťovadlo v potravinářském průmyslu
Sójová bílkovina	Sójové boby	Interakce dvou globulárních proteinů (např.: glycininu a β -conglycininu)	Tepelně podmíněné gelovatění
Vaječné bílkoviny	Vejce	70% tvoří albumin (globulární proteiny obsahující vlákna ovomucinu). 30% tvoří vaječný žloutek (několik druhů lipoproteinů o nízké hustotě)	Gelující a zahušťující činidlo v pekařském a cukrářském průmyslu
Zein	Kukuřice	Peptidový řetězec obsahující převážně prolamin	V gelu obalené bonbóny, oříšky, ovoce, tabletky a další výrobky potravinářského a pekařského průmyslu

Obecně lze konstatovat, že zdrojem látek tvořící gel nebo podporující vznik gelu jsou látky jak živočišného, tak rostlinného původu. V drtivé většině případů se v potravinářském průmyslu gelující činidla používají k zahuštění polotovarů či přímo produktů (bez významné ztráty kapalné složky v porovnání s jiným tepelným zpracováním s cílem zahustit produkt – vysoušením, dehydratací, odpařováním).

2.3 Typy gelů

Polymerní molekuly v gelu nejsou zesíťovány kovalentními vazbami (s výjimkou proteinových gelů), místo toho jsou molekuly spojeny slabými intermolekulárními silami, jako jsou vodíkové můstky, elektrostatické, hydrofobní síly a Van der Waalsovi síly. Gelovatění závisí na interakci dvou nebo více polymerních molekul vytvářejících gel. Existují různé druhy gelů v závislosti na jejich strukturních prvcích a vlastnostech.

2.3.1 Hydrogel

Jedná se o síť polymerních řetězců, které jsou ve vodě nerozpustné, někdy se vyskytují jako koloidní gel, ve kterém je voda disperzním médiem. Jsou to vysoce absorpční (obsahují více než 99 % vody) přírodní nebo syntetické polymery. Kvůli vysokému obsahu vody hydrogely vykazují stupeň pružnosti velmi podobný přirozené tkáni. Environmentálně citlivé hydrogely mají schopnost pociťovat změny pH, teploty nebo koncentrace metabolitu a uvolňovat jejich zatížení v důsledku takové změny. Přírodní hydrogelové materiály zahrnují agarózu, methylcelulózu a jiné přírodně odvozené polymery. Používají se v systémech s prodlouženým uvolňováním pro léčiva a různé druhy živin.

2.3.2 Organogel

Jedná se o nekystalický, nesklovitý, tepelně vratný tuhý materiál, složený z kapalné organické fáze zachycené v strukturní síti. Kapalinou může být organické rozpouštědlo, minerální nebo rostlinný olej. Rozpustnost a rozměry částic tvořících strukturní síť jsou důležitými vlastnostmi pro elastické vlastnosti, pevnost a celistvost výsledného gelu.

2.3.3 Xerogel

Jedná se o pevnou látku vzniklou sušením z gelu, která nebyla narušena smrštěním. Xerogely obvykle udržují vysokou pórovitost (25%) a obrovskou mezifázovou plochu ($150-900 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) spolu s velmi malou velikostí pórů (1-10 nm).

2.3.4 Aerogely

Jedná se o koloidní gel, ve kterém se jako disperzní médium používá plyn. Při odstraňování rozpouštědla za hyperkritických (superkritických) podmínek se síť nesmršťuje a vytváří se vysoce porézní materiál s nízkou hustotou, známý jako aerogel. Tyto materiály mají většinou mimořádné vlastnosti, včetně velmi nízké hustoty, vysoce specifických povrchových ploch a vynikajících tepelně izolačních vlastností.

2.3.5 Slabé (nestálé) gely

Některé polysacharidy, často potravinářského původu, vykazují vlastnosti mezi polysacharidovými roztoky a pravými gely. Při slabé deformaci se tyto gely chovají jako elastické gely. Při dostatečně velkých deformacích nebo při vysokých rychlostech smykové deformace se porušují, nevratně se rozpadají a proudí. Mezi polysacharidy, které vykazují uvedené vlastnosti, patří například xantanová nebo gellanová guma.

2.3.6 Tekuté gely

Gely se utvářejí, za klidových podmínek, při chladnutí teplých hydrokoloidních disperzí. Disperze se rozděluje na oblasti bohaté na polymerní mikročástice a na oblasti chudé na tyto částice. Tyto oblasti s řídkým výskytem mikročástic, tvoří takzvané výplňové oblasti. Celková reologie systému pochází z interakcí mezi částicemi navzájem. Ty mohou být narušeny nízkými smykovými poměry a smykovým namáháním. Tekuté gely mohou vytvářet širokou škálu textur, včetně lehkého tekutého gelu a hustší roztíratelné pasty. Gellanová guma je schopná tvorby tekutého gelu při své nízké koncentraci v roztoku. Polysacharidy, jako je agar a karagenan, jsou schopny tyto gely tvořit za přítomnosti s jinými tekutými potravinami.

2.3.7 Tepelně citlivé gely

Gely se dělí na tepelně reverzibilní (vratné) nebo tepelně irreverzibilní (nevratné). Tepelně vratné gely se při zahřívání roztékají a při ochlazování tvoří gel (např. agar, karagenan, gellanová guma a želatina). Tepelně nevratné gely se utvoří při zahřívání a dále se již neroztékají (například alginát, nízký methoxyl pektin). Na základě teplotní závislosti modulu pružnosti mohou být polysacharidové gely klasifikovány do čtyř kategorií. Jedná se o

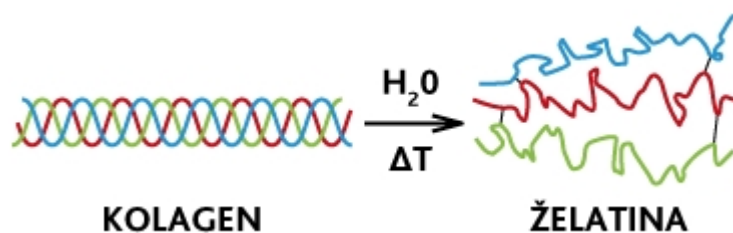
- (a) gely utvořené za studena jako agaróza, karagenan a gellan, které tvoří gel při ochlazování disperze,
- (b) gely utvořené za tepla jako některé deriváty celulózy (MC a HPMC), konjac glucomannan, které tvoří gel při zahřívání disperze,
- (c) přechodné gely jako xyloglukan, který se utvářejí ve specifických teplotních rozmezích a zůstávají v tekutém stavu mimo tento teplotní rozsah,
- (d) obráceně přechodné gely jako je směsný roztok methylcelulózy a želatiny, které utváří gel při vyšší a nižší teplotě a zůstávají v tekutém stavu ve zbylém teplotním rozmezí.

2.4 Mechanismus vzniku gelů a jejich obecné vlastnosti

Pro získání gelu se specifickými vlastnostmi je důležité porozumět mechanismu vzniku gelů. Tvorba gelu nejvíce závisí na gelujících činidlech, povaze a vzájemném působení jednotlivých složek, které tvoří gel.

2.4.1 Želatina

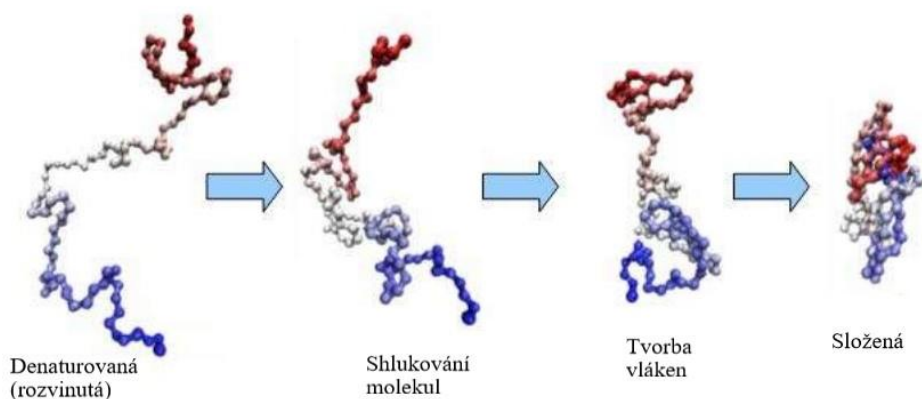
Želatina se s rostoucí teplotou roztéká, při chladnutí tuhne (bod tání 28–30 °C). Společně s vodou vytváří polotuhý koloidní gel. Surovinou pro získání želatiny je kolagen, který nevratným procesem za působení tepla případně vody denaturuje v želatinu (šroubovicová struktura vláken se rozpadá a vzniká síť tvořená náhodně spletenými makromolekulami).



Obrázek 1 – proces vzniku želatiny [6]

2.4.2 Syrovátkové bílkoviny

Jedná se o globulární protein, u kterého je typické teplotně podmíněné gelovatění. Probíhá přes řadu změn (denaturace přírodního proteinu-shlukování rozložených molekul-tvorba vláken ze sloučených molekul-tvorba sítě z vláken. Ke shlukování dochází za přítomnosti solí.



Obrázek 2 – proces vzniku gelu ze syrovátkové bílkoviny [4]

2.4.3 Sójové bílkoviny

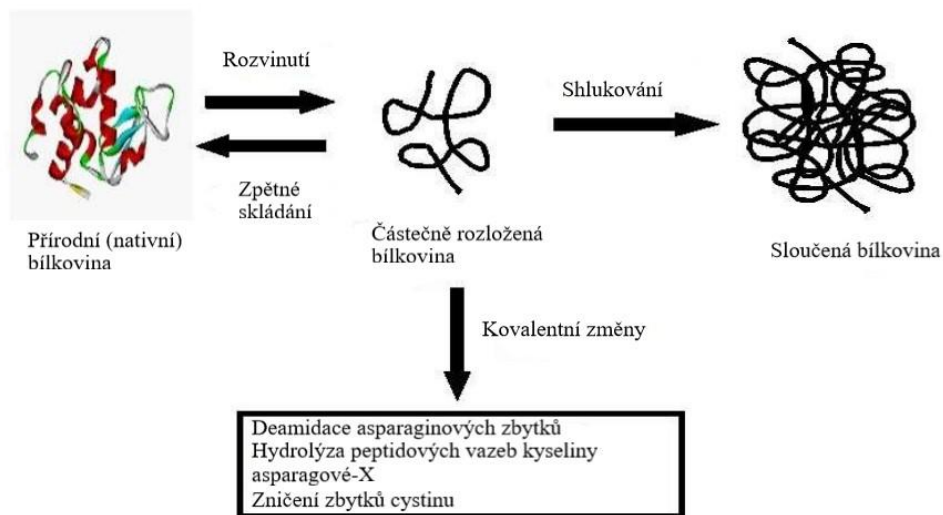
Pro získání gelu ze sójových bobů využíváme ohřívání sójové mouky nebo mléka, za následného přidání solí (Ca^{++} nebo Mg^{++}). Jako alternativu můžeme použít okyselení směsi s glukono- δ -laktone, které také podporuje shlukování denaturovaných bílkovinných molekul.

2.4.4 Mléčné bílkoviny

Molekuly kaseinu jsou silně hydrofobní, tudíž jsou submicely drženy pohromadě pomocí hydrofobních vazeb a solných můstků. Enzymatická hydrolyza k-kaseinu pomocí syřidla uvolňuje CMP (kaseinomakropeptid) a způsobuje agregaci micel, které vedou k tvorbě gelu.

2.4.5 Vaječné bílkoviny

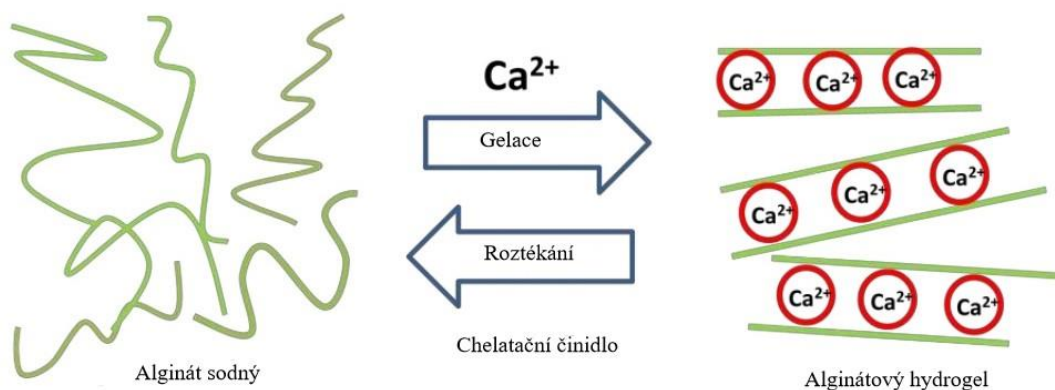
Tekutý bílek i žloutek mají schopnost při zvyšování teploty tvořit gely. Formování gelu je dvoustupňový proces, nejdříve dojde k denaturaci bílkovin, které jsou následně shlukovány za vzniku gelu.



Obrázek 3 – proces vzniku gelu z vaječných bílkovin [4]

2.4.6 Algináty

Gely se vytvářejí po přidání polyvalentních kationtů při nízkém pH (<4). Zbytky kyseliny guluronové poskytují oporu efektivního vazebného místa pro kationty. Síla gelu závisí také na povaze dvojmocného kationtu v pořadí $\text{Ba}^{++} > \text{Sr}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++}$. Na rozdíl od většiny polysacharidových gelů, mají alginátové gely charakteristickou vlastnost tvorby za studena.



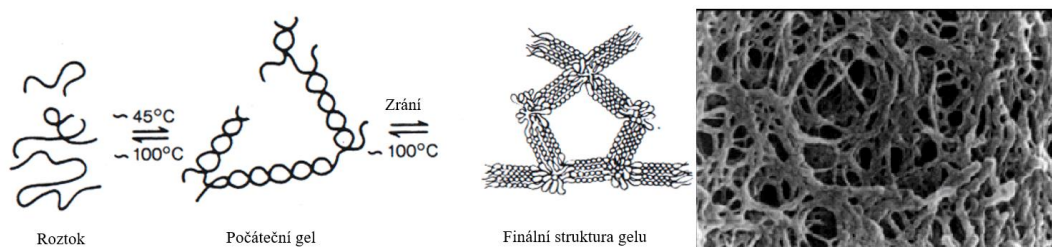
Obrázek 4 – proces vniku gelu z alginátu [4]

2.4.7 Pektin

Schopnost pektinu vytvářet gel silně závisí na stupni esterifikace. Vysoké methoxylové pektiny budou vytvářet gely pouze v přítomnosti cukrů nebo jiných rozpuštěných látek (jako jsou polyoly nebo jednosytné alkoholy) a při dostatečně nízkém pH (3,0 až 4,5). Tvorba gelu u nízkých methoxylových pektinů nastává pouze za přítomnosti dvojmocných kationtů, jako je vápník.

2.4.8 Agar

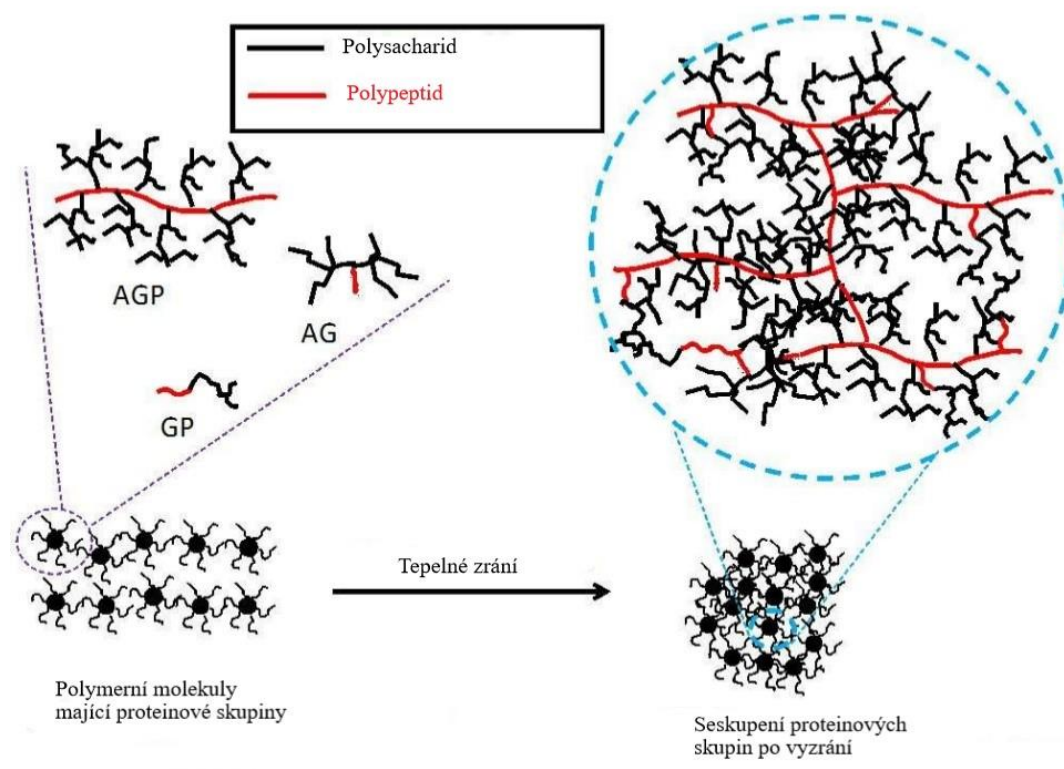
Agar je přírodní polysacharid s vysokou gelující schopností, který se vyrábí z červených mořských řas. Tvorba gelu je zde vratný proces, který je zajišťován uskupením vodíkových vazeb. Gel taje při 96 °C a tuhne při 40 °C.



Obrázek 5 – proces vniku gelu z agaru [5]

2.4.9 Škrob

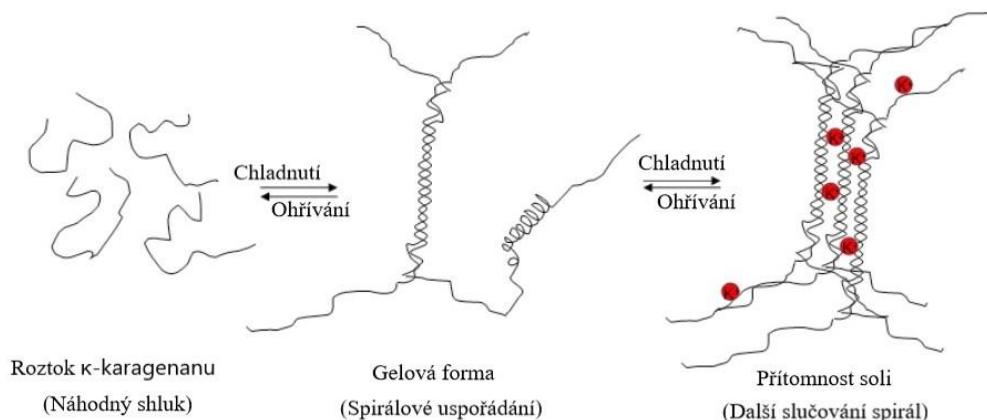
Když se škrobová zrna zahřejí nad určitou kritickou teplotu (teplota gelovatění) v přebytku vody, dochází k tvorbě gelu. Amyláza se vylučuje ze škrobových zrn, ta vlivem teploty bobtnají, zvětšují svůj objem, a nakonec se rozpadají. Dochází tak k nevratnému nabobtnání škrobových zrn spolu s rozpuštěním amylyazy. Pokud se škrobová směs ochladí a koncentrace amylyazy bude nad kritickou hranicí C^* , což odpovídá v případě škrobu koncentraci 2-4 % (v závislosti na typu škrobu), vznikne gel. Gel vzniká především tvorbou mikro krystalů amylyazy. Škrobový gel se velmi podobá gelu polymernímu, je tvořen nerozpustným amylopektinem a rozpustnou amylyazou.



Obrázek 6 – proces vniku gelu ze škrobů [4]

2.4.10 Karagenan

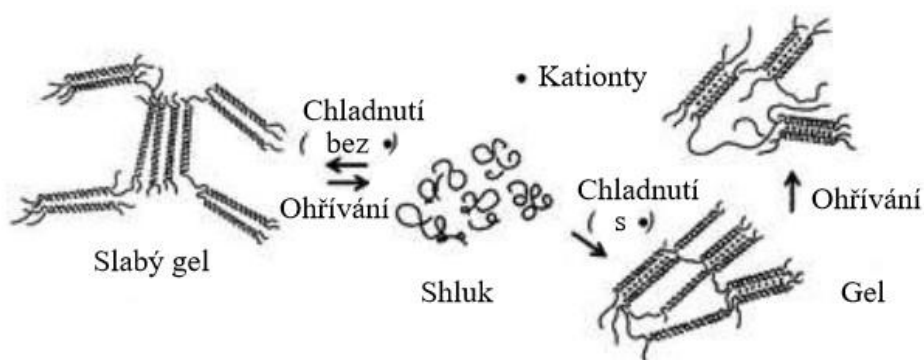
Karagenan je iontový polymer, při chladnutí vytváří spirálovité gely za přítomnosti solí (elektrolytů), zejména K^+ iontů. Některé kationty jako K^+ , Rb^+ , Cs^+ a NH_4^+ podporují tvorbu spirál a vlastní proces gelovatění. K tvorbě gelu dochází při chladnutí roztoku karagenanu. Nejdříve dochází k tvorbě jednotlivých spirál, které jsou náhodně uspořádány. Při dalším chladnutí za přítomnosti solí dochází k slučování spirál do uspořádaných spirálových soustav.



Obrázek 7 – proces vzniku gelu z karagenanu [4]

2.4.11 Guma gellan

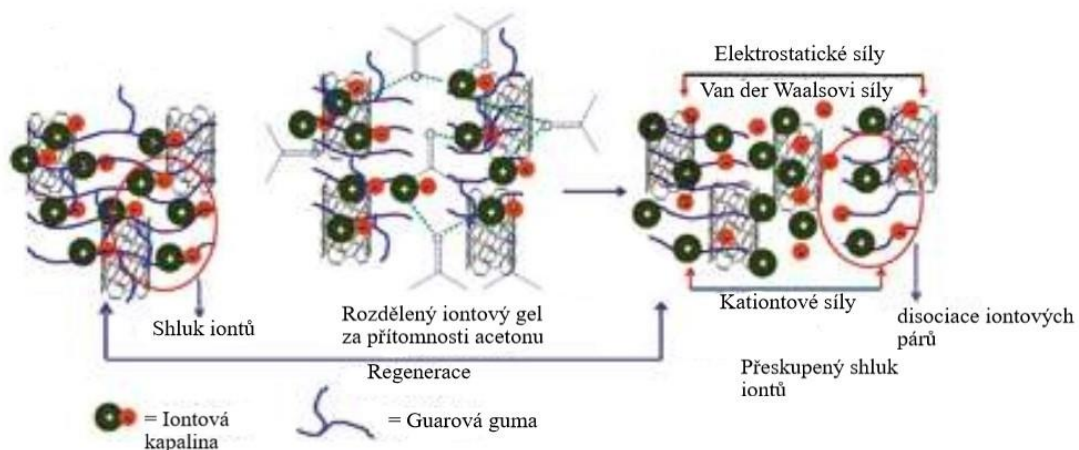
Tvorba gelu z gellanové gummy je založena na sférickém modelu. Za vysoké teploty v tekutém stavu je gellan v uspořádání jednoduchých svitek. Při chladnutí dochází k utváření trojrozměrné, levotočivé dvojité šroubovice. Tato šroubovice je vnitřně stabilizována pomocí vodíkových můstků. K tomuto procesu dochází v teplotním rozmezí 30° C až 50 ° C, v závislosti na působení iontové síly. Jednotlivé šroubovice za přítomnosti kationtů utvářejí oblasti, ve kterých dochází k tvorbě trojrozměrných gelových sítí. V tomto kroku dochází k přetváření solů na gel. Proces vzniku závisí na typu kationtu, iontové síle, teplotě a koncentraci.



Obrázek 8 – proces vzniku gelu z gummy gellan [4]

2.4.12 Guarová guma

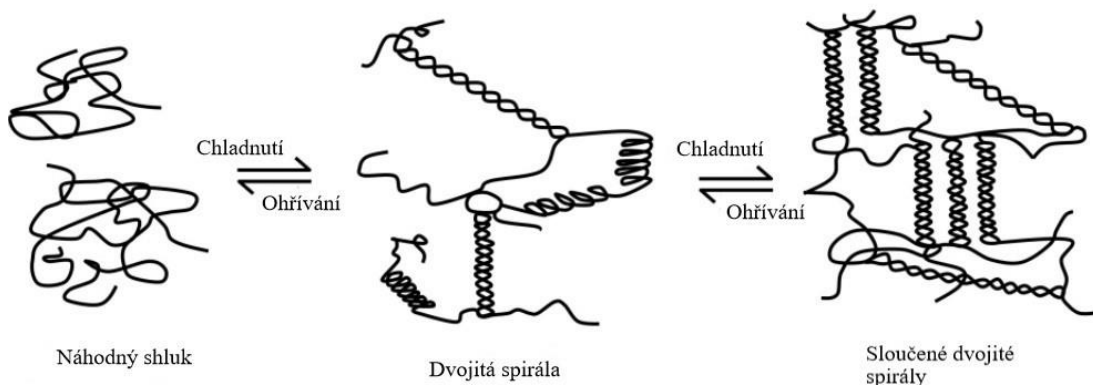
Gel se tvoří při chladnutí v přítomnosti solí. Molekuly se nejdříve shlukují za následné tvorby spirál. Guma je snadno rozpustná ve studené vodě. Poměr amannózy a galaktózy je přibližně 2: 1 a jednotlivé složky vykazují slabý synergismus.



Obrázek 9 – proces vzniku gelu z guarové gummy [4]

2.4.13 Xantanová guma

Gel se tvoří za přítomnosti elektrolytů v širokém rozmezí pH a při vysokých teplotách. Vlastní gelující proces probíhá při chladnutí. Xanthanové a polymananové dvojspirály se slučují do uspořádaných shluků dvojsíral.



Obrázek 10 – proces vzniku gelu z xantanové gummy [4]

2.4.14 Karobová guma

Gel vzniká při procesu chladnutí. Polymannanové řetězce jsou sdužovány do šroubovic. V případě karobové gummy se na sdužování podílejí oblasti s nedostatkem galaktózy.

2.5 Reologické vlastnosti gelů

Znalost reologických vlastností látky umožňuje popis chování látky při jejím zatěžování či toku, tzn. pokud známe tokové, resp. mechanické vlastnosti látky, je možné navrhnout stroj či zařízení pro dopravu či deformaci takové látky. Reologické vlastnosti jsou tedy z pohledu inženýrského návrhu strojů nezbytné.

V této kapitole se zaměříme na zkoumání reologických vlastností gelů, jakožto zástupců viskoelastických látek. Jak již název napovídá, tyto látky vykazují současně viskózní i elastické vlastnosti. Viskózní vlastnosti zkoumáme a počítáme dle Newtonova zákona, elastické potom dle zákona Hookova. Mezi specifické vlastnosti těchto materiálů patří více či méně časově opožděná reakce na působené napětí nebo deformaci, ke stejnému jevu dochází také při odstraňování těchto působení [18].

Nejčastějším způsobem zkoumání těchto vlastností jsou oscilační testy. Jedním takovým testem se budeme zabývat v následující kapitole práce.

Vlastní měření vlastností viskoelastických látek probíhá řízeným nastavením smykové deformace jako funkce sinus. Smykovou deformaci lze nahradit smykovým napětím [18].

$$\gamma(t) = \gamma_A \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

Výstupem je pro nás křivka smykového napětí (deformace) jako fázově posunutá funkce sinus.

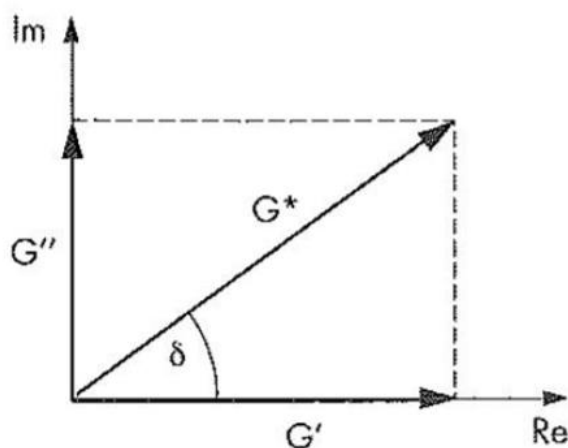
$$\tau(t) = \tau_A \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad (2)$$

Symbol δ v rovnici vyjadřuje úhel fázového posunu. Při dané aplikaci se můžeme setkat také s pojmenováním ztrátový úhel. Tento úhel nabývá hodnot (0° - 90°) [18].

Při zkoumání viskoelastických látek se můžeme setkat se třemi druhy modulů. Prvním z nich je modul dynamický (elastický) G' . Ten odpovídá množství uložené deformační energie v průběhu namáhání. Tato energie se po odstranění namáhání zpětně využívá v procesu reformace, kdy se snaží kompenzovat vzniklé deformace. Druhým modulem je modul ztrátový (viskózní) G'' . Ten odpovídá množství spotřebované

deformační energie v průběhu namáhání. Tato energie, jak již napovídá název modulu, je „ztracena“ a nelze ji tak využít v procesu reformace. Ztrátový modul je zodpovědný za nevratné deformace, kdy se po ukončení namáhání těleso nevrací zpět do původního tvaru. Třetím modulem je modul komplexní G^* . Ten je výsledkem vektorového součtu předešlých dvou modulů. Komplexní modul tak zachycuje celkové chování látky [18].

Na obrázku níže můžeme pozorovat vztah mezi jednotlivými moduly a modulem komplexním. Dynamický modul je vynesena na ose x, ztrátový na ose y.



Obrázek 11 – Vektorový diagram [18]

Z vektorového diagramu můžeme pomocí Pythagorovy věty vyjádřit komplexní modul i ztrátový úhel. Tvary obou rovnic jsou vyjádřeny níže.

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (3)$$

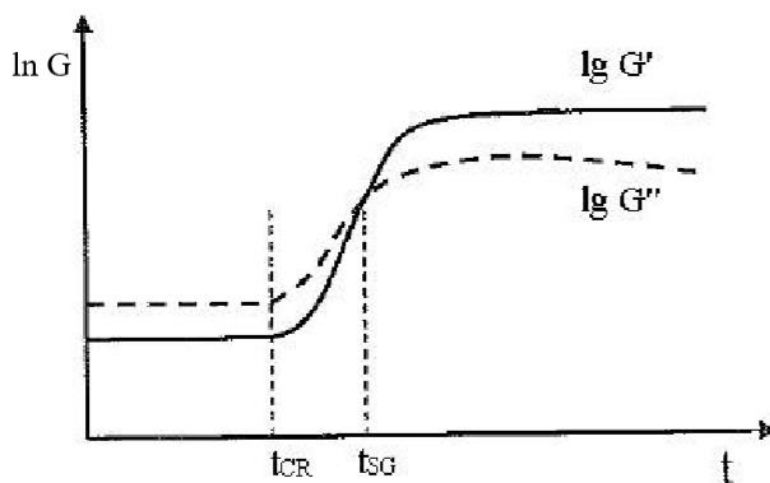
$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (4)$$

Oscilačních testů využíváme například na zjišťování vlastností vzorků při vzniku síťových struktur v čase. Tyto testy probíhají za konstantního napětí v lineární oblasti viskoelastivity vzorku.

Na grafu níže můžeme pozorovat logaritmický průběh dynamického a ztrátového modulu v čase. Na ose x je znázorněn čas na osy y potom logaritmus jednotlivých modulů. V grafu jsou vyznačeny také dva časové (kritické) body. Prvním z nich je časový bod t_{CR} . Tento bod označujeme jako počátek procesu gelatinizace. V grafu ho rozeznáme podle počátku stoupajícího trendu obou modulů. V tomto trendu moduly pokračují až do

dooby, než se asymptoticky přiblíží konstantní hodnotě. Druhým časovým bodem je bod t_{SG} . Tento bod v grafu rozeznáme jako průsečík křivek závislosti obou modulů, což znamená ($G' = G''$) a velikost $\tan \delta = 1$. V bodě t_{SG} dochází k přechodu mezi solem a gelem, proto jej lze označit za bod konce gelatinizace. Před vlastní tvorbou gelu vzorek vykazoval viskózní chování, byl ve stavu solu. Platilo tedy $G' < G''$. Po překročení bodu t_{SG} , kdy je vzorek ve stavu gelu, naopak platí $G' > G''$.

Na konci této kapitoly je umístěna přehledná tabulka zachycující srovnání obou modulů a ztrátových úhlů pro různé druhy látek, resp. přechodů látky z jednoho stavu do druhého [18].



Obrázek 12 – Graf časové závislosti G' a G'' v průběhu tvorby gelu [18]

Tabulka 3 – Hodnoty modulů a ztrátového úhlu pro jednotlivé fáze vzorku [18]

ideálně viskózní tok	viskoelastické kapaliny	bod gelace	viskoelastický gel nebo pevná látka	ideálně elastická deformace
$\delta = 90^\circ$	$90^\circ > \delta > 45^\circ$	$\delta = 45^\circ$	$45^\circ > \delta > 0^\circ$	$\delta = 0^\circ$
$\tan \delta \rightarrow \infty$	$\tan \delta > 1$	$\tan \delta = 1$	$\tan \delta < 1$	$\tan \delta \rightarrow 0$
$G' \rightarrow 0$	$G' < G''$	$G' = G''$	$G' > G''$	$G'' \rightarrow \infty$

2.6 Používané metody pro zjišťování vlastností gelů

Správné metody určování vlastností gelů jsou pro následné využití gelů v potravinářském průmyslu klíčové. Pomáhají nám nejen při dosahování ideálních struktur a vlastností u potravin, ale také poskytuje důležité informace o reologických vlastnostech, se kterými dále pracujeme při průmyslovém zpracování potravin.

Tabulka 4 – Metody používané pro zjišťování reologických vlastností gelů [1]

Povaha testu	Druh měření	Použitá metoda	Měřené parametry	Využití
Základní testy	Stlačování	Systém pro měření textury	Modul pružnosti, Poissonova konstanta	Surimi gel
	Napětí po uvolnění	Systém pro měření textury	Zbytkové napětí, relaxační čas	Gellanová guma
	Tečení materiálu (creep)	Napět'ový rheometr	Smykový modul, creep, poddajnost	Sójové a želatinové gely
	Kmitání (vibrační)	Napět'ový rheometr	Dynamický modul (G'), ztrátový modul (G''), fázový úhel, komplexní modul a viskozita	Viskoelastické vlastnosti rýže, sójových a smíšených gelů
Empirické testy	Průrazová síla	Systém pro měřená textury	Průrazové charakteristiky	Vlastnosti rýžového gelu
	Stlačování	Systém pro měřená textury	Maximum síly, pevnost, stlačovací síla	Měření vlastností a tuhosti gelů
Srovnávací testy	Analýza profilu textury	Systém pro měřená textury	Parametry analýzy profilu textury, jako tvrdost, křehkost, přilnavost, pružnost, soudržnost	Potravinářské gely

Tabulka 5 – Pokročilé metody používané pro zjišťování fyzikálních vlastností gelů [1]

Druh měření	Použitá metoda	Měřené parametry	Využití
Strukturální charakteristika	Diferenční skenovací kalorimetr (DSC)	Tepelný tok	Film gellanové gumy se směsí polyvinyl alkoholu
	Rentgenová difrakce a SAXS (druh nano rentgenu)	Analýza velikosti částic	Nano vstřebávací systémy v potravinách, lécích
	Kolorimetr	Měření barev	Jedlé povlaky z gellanové gumy
Mikroskopická charakteristika	Světelná mikroskopie (LM)	Oblasti zrn	Tapiokový škrobový gel
	Skenovací elektronový mikroskop (SEM)	Strukturální uspořádání složek	Počet, oblast a umístění částic v gelu
	Transmisní elektronová mikroskopie (TEM)	Strukturální rozdělení složek	Charakteristické studie smíšeného gelu
	Mikroskopie atomárních sil	Struktura molekul	Strukturální charakteristiky nanočástic
Molekulární charakteristika	Spektroskopie nukleární magnetické resonance (NMR)	Změny uskupení při tvorbě gelu	Strukturální charakteristiky složek
	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR)	Molekulární struktura	infráčervené spektrum složek
	Ramanova spektroskopie (FT-RAMAN); Rezonance poblíž infračerveného záření	Molekulární charakterizace	Funkční vlastnosti pektinů

Detailní analýza	Vakuová trouba	vlhkost	Odhad vlhkosti
	Atomová absorpční spektroskopie	Obsah minerálů	Modelový systém založený na chitosanu a bílkovinném syrovátkovém izolátu
	Kjeldhalův přístroj	stanovení přítomnosti dusíku (množství bílkoviny)	Syrovátková bílkovina, škrobový gel z manioku
	dinitrosalicylát (DNS)	Stanovení množství sacharidů	Obsah sacharidů v gelu

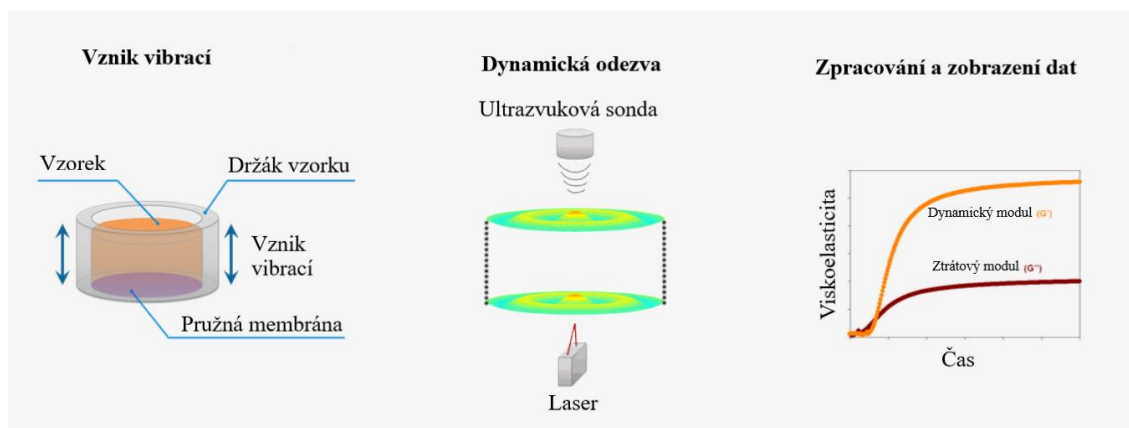
V dalších kapitolách jsou uvedeny a popsány jen vybrané metody měření fyzikálních vlastností gelů, které jsou používané nejčastěji a jsou relativně dostupné s vysokým stupněm opakovatelnosti.

2.6.1 Oscilační reometrie

Existuje několik typů zařízení, které umožňují měření viskoelastických vlastností zkoumaných gelových vzorků. Asi nejčastěji používanými jsou univerzální oscilační reometry a speciální vibrační přístroje navržené pro měření gelů. Nicméně oscilační reometry jsou více vhodné pro kapaliny nebo výrazně zředěné roztoky a gely. V případě měření „těstovitých“ vzorků je třeba použít speciální geometrie nebo reometr upravit tak, aby nedocházelo k vytékání měřeného vzorku z měřicí cely. Proto se častěji v praxi používají vibrační přístroje, zkonstruované přímo pro měření tužších gelových látek, jako je například ElastoSens X3, firmy Lab instrumentst [19].

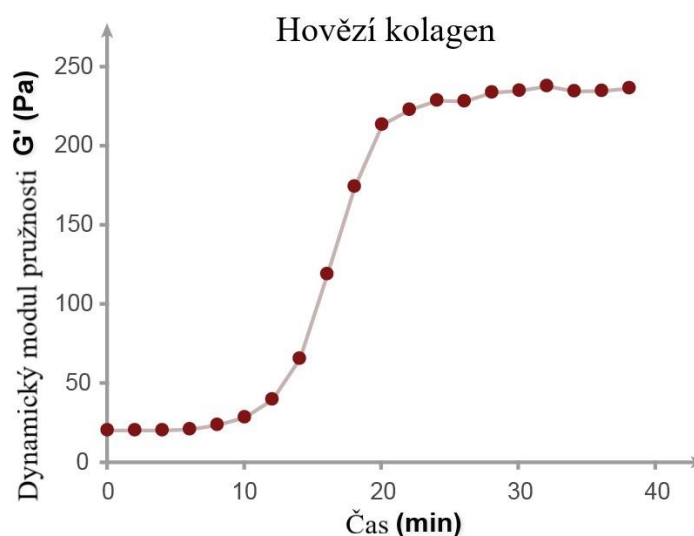
Výstupními daty jsou grafy, na kterých mohou být vykresleny moduly (pružnosti, dynamický, ztrátový) v závislosti na čase (lze i na teplotě). Z těchto dat lze vypočítat změnu vlastností gelů v čase (například při jejich utváření). Popřípadě měnit vlastnosti gelů, podmínky jejich utváření a následně pozorovat jednotlivé rozdíly při změně vlastností v čase.

Princip: Jedná se o mechanické testování, které probíhá v reálném čase. Vzorek je testován nedestruktivní a bezkontaktní metodou. Při zkoumání dochází k vibracím v řádu mikrometrů, které jsou zachytávány pomocí snímacích sond. Data jsou softwarově zpracována a vyhodnocena. Výstupem jsou pro nás přehledné grafy. [19]

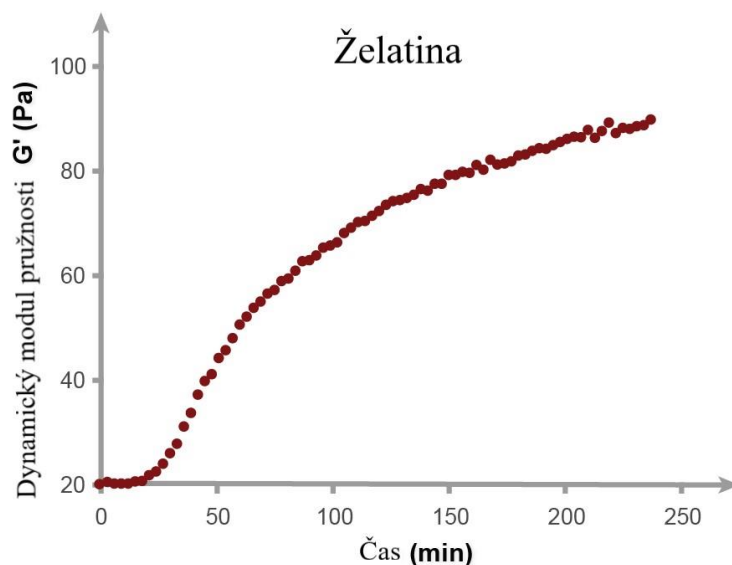


Obrázek 13 – Princip fungování přístroje ElastoSens X3 [19]

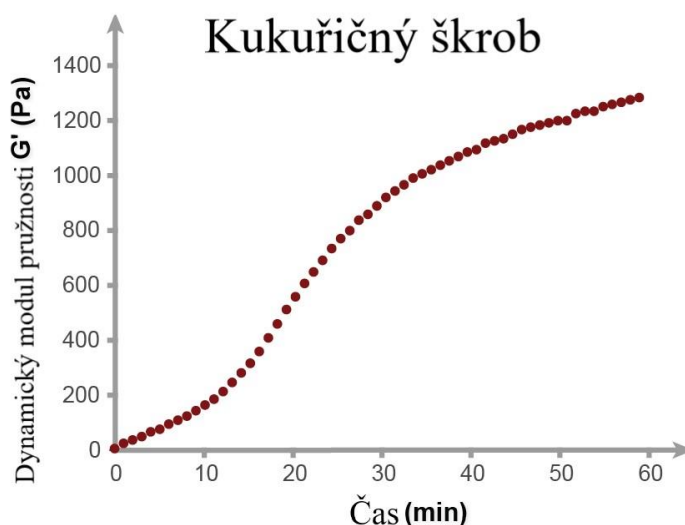
Na následující trojici grafů představuje měření tří různých druhů gelů. Grafy zachycují změnu dynamického modulu v čase při utváření jednotlivých gelů. Za povšimnutí stojí jak rozdílné časy utváření jednotlivých gelů, tak výsledný dynamický modul utvořeného gelu. Veškeré tyto informace jsou pro nás velice cenné při aplikaci těchto gelů v praxi, resp. návrhu strojů pro jejich zpracování.



Obrázek 14 – Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na čase, během utváření gelu z hovězího kolagenu [20]



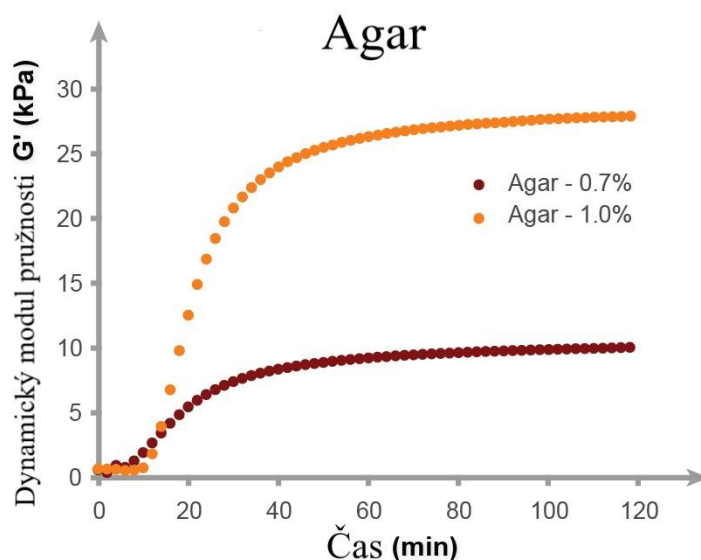
Obrázek 15 – Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na čase, během utváření gelu z želatiny [20]



Obrázek 16 – Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na čase, během utváření gelu z kukuřičného škrobu [20]

Graf níže vykresluje změnu dynamického modulu pružnosti v čase při utváření gelu z agaru za různých koncentrací. Tento graf přikládám jako důkaz k tvrzením z kapitoly 2.2.2 Podmínky vzniku gelu, konkrétně pasáž 2.2.2.7 Koncentrace (množství) gelujícího činidla. Tam se uvádí, že agar je schopen tvořit gely nad koncentrací 0,2%. My zde používáme koncentrací 0,7% a 1%, tudíž se již nacházíme v pásmu tvorby gelu. Přesto má pro nás graf velmi dobrou vypovídající hodnotu, protože znázorňuje, jak s narůstající koncentrací dochází k tvorbě silnějšího (kvalitnějšího) gelu. Stejně tak jsme s tímto

měřením schopni dokázat vliv teploty, hodnoty pH a dalších vlivů na tvorbu, popřípadě kvalitu gelu.



Obrázek 17 – Graf závislosti dynamického modulu pružnosti na čase, během utváření gelu z agaru za různých koncentrací [20]

2.6.2 Experimenty s vytlačovacím reometrem

Z hlediska návrhu čerpadla a čerpacího výkonu gelovité látky, lze nejlépe použít reologická data s experimentu s vytlačovacím reometrem, neboť v obou případech je dosaženo stejných řádů smykových rychlostí, oproti například rotačním reometrům. Proto se další část práce zaměřila na nalezení experimentálních dat gelu používaného v potravinářském průmyslu. Gel, jak již bylo řečeno, se chová jako neneutonská látka. Nejčastější model reologického chování používaný praxí je dvouparametrický model mocninový. V rámci literární rešerše se podařilo nalézt dvě práce zabývající se experimentálním vyšetřováním kolagenní hmoty, jejíž konzistence odpovídala hustému gelu. Práce se zabývaly stejnou látkou vyšetřovanou ve dvou geometriích vytlačovacího reometru a to obdélníkovou štěrbinou a mezikružím.

Nejprve se podíváme na získaná data z měření v obdélníkové štěrbině a poté je srovnáme s daty získanými z měření ve štěrbině kruhové.

2.6.2.1 Měření v obdélníkové štěrbině

Jako měřicí přístroj byl použit kapilární reometr s obdélníkovou štěrbinou. Zkoumaným vzorkem se stal hovězí kolagen s 9,5% podílem pevné složky. Pro pokus

byly použity tři různé druhy štěrbin, lišících se svojí geometrií. Pomocí hydraulického pístu byla kolagenní hmota protlačována trasou, v níž byl průchod hmoty monitorován tlakovými čidly. Měření v obdélníkové štěrbině proběhlo v rozsahu rychlostí deformace 1500 s^{-1} až 5000 s^{-1} [21].

Tabulka 6 – Data naměřená kapilárním reometrem s obdélníkovou štěrbinou [21]

Mocninový model kapaliny	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]
Hodnota	0.161	8700	0.275	850	0.283	990
Standardní odchylka	0.073	3400	0.016	85	0.050	330

H/W představuje tři různé geometrie obdélníkové štěrbin s různým poměrem šířka a výšky průtočného průřezu, n je index toku a K je koeficient konzistence vyhodnocený z reogramů.

2.6.2.2 Měření v kruhové štěrbině

Jako měřicí přístroj byl použit kapilární reometr s mezikruhovou štěrbinou. V tomto pokusu se zkoumaným vzorkem stal, stejně jako v předešlém případě, hovězí kolagen, zde však v odlišné koncentraci, konkrétně s 8% podílem pevné složky. Stejně jako v předešlém případě byla kolagenní hmota protlačována trasou pomocí hydraulického pístu. Na trase byla pomocí tlakových čidel snímána tlaková ztráta. Měření v mezikruhové štěrbině proběhlo v rozsahu rychlostí deformace 350 s^{-1} až 3000 s^{-1} [22].

Tabulka 7 – Data naměřená kapilárním reometrem s kruhovou štěrbinou [22]

Mocninový model kapaliny		
	n [-]	K [Pa.s ⁿ]
Hodnota	0,233	1700
Standardní odchylka	0,017	204

Autoři práce [21] vyhodnotili reologický model mocninové kapaliny a index toku n a koeficient konzistence je uveden v tabulce č. 7. V rámci vymezeného času na vypracování práce se nepodařilo nalézt další relevantní vědecké publikace, které by se

zmiňovaly o tokových vlastnostech podobných potravinářských gelů. Proto pro výpočtovou část byly zvoleny tokové vlastnosti látky dle výše uvedených prací.

2.7 Dílčí závěry vyplývající z literární rešerše

V této kapitole byly shrnuty základní definice popisu látky gel. Z těchto fyzikálně chemických popisů gelu lze snad pohledem technika popsat gel jako polotuhou (polotekutou) látku obsahující nejméně dvě složky, z nichž pevná složka tvoří síť z dlouhých zapletených makromolekul a tekutá (kapalina, plyn) složka je v této síti chycena.

Dále jsou zde uvedeny mechanismy výroby gelu, popsány faktory, které vznik a tvorbu gelu ovlivňují, v tabulkách přehledně uvedená gelující činidla.

Kapitola také zahrnuje základní rozdělení typů gelů, čím se od sebe jednotlivé typy liší, popisuje mechanismy vzniku gelu a jeho obecné vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou dále rozepsány z hlediska využití gelu v potravinářském průmyslu a možností modifikace těchto vlastností z cílem získat požadovaný produkt. Jsou zde uvedeny metody a vhodné přístroje pro měření těchto dílčích vlastností. Vzhledem k zaměření výpočtové části bakalářské práce, byl kladen i velký důraz na nalezení informací o reologických vlastnostech různých typů potravinářských gelů.

V rámci vymezeného času na vypracování práce se nepodařilo nalézt mnoho relevantních vědeckých publikací, které by byly zaměřené na tokové vlastnosti potravinářských gelů elastické konzistence. Na základě uvedených zdrojů a dle doporučení vedoucího práce byly pro výpočtovou část bakalářské práce zvoleny parametry mocninového modelu, které popisují tokové vlastnosti směsi hovězího kolagenu a vody v relativně vysokém hmotnostním podílu kolagenu, kdy směs již tvoří elastický gel. Tato směs je používána jako polotovar pro výrobu masových výrobků.

3 VÝPOČET

Výpočetní část bakalářské práce se zaměřuje na volbu vhodného čerpadla pro gelovitou látku (kolagen) zadanou potrubní soustavou.

Nejprve si musíme ujasnit, jaký druh látky plánujeme soustavou (v našem případě potrubím) dopravovat. Jedná se o kolagenní hmotu, která vykazuje chování nenewtonovské látky s viskoelastickými vlastnostmi. S takovýmto typem látky musíme počítat odlišným způsobem nežli s běžnými newtonskými látkami, například vodou. Vzhledem k tomu, že se jedná o návrhový výpočet čerpadla pro dopravu látky rovným potrubím, viskoelastické vlastnosti se při toku potrubím neprojeví (v čerpadle ano), a látku lze pro inženýrské výpočty popsat mocninovým modelem. V rovnicích musíme zohlednit specifické chování nenewtonských látek. V našem případě, kdy stěžejním parametrem pro zvolení čerpadla bude tlaková ztráta a zdánlivá viskozita, jsou těmito zohledněními index toku a koeficient konzistence (mocninový model). Oba tyto parametry jsou zohledněny ve výsledné rovnici pro výpočet tlakové ztráty nenewtonské kapaliny [2].

$$\Delta p = \frac{2KL}{R} \cdot \left[\dot{V} \cdot \frac{3 + \frac{1}{n}}{\pi \cdot R^3} \right]^n \quad (5)$$

3.1 Zadání

Navrhnout vhodné průmyslové řešení dopravy kolagenní látky krátkým potrubím, kruhového průřezu, mezi zásobníkem hmoty a extrudérem pro finální zpracování látky (např.: plnění gumových medvídků do formiček). Konkrétním cílem je návrh vhodného druhu čerpadla s přihlédnutím na jeho konkrétní využití a zadané parametry. Námí navržené čerpadlo bude sloužit pro čerpání látky mezi zásobníkem a extruderem. Extruder je vybaven vlastním čerpadlem pro překonání tlakové ztráty ve vytlačovací hlavě.

3.1.1 Zadané parametry

Požadovaný hmotnostní průtok hmoty potrubím $\dot{m} = 4000 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} = 1,11 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Index toku hmoty $n = 0,28$

Koeficient konzistence $K = 1100 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$

Výpočtová délka potrubí $L = 1 \text{ m}$

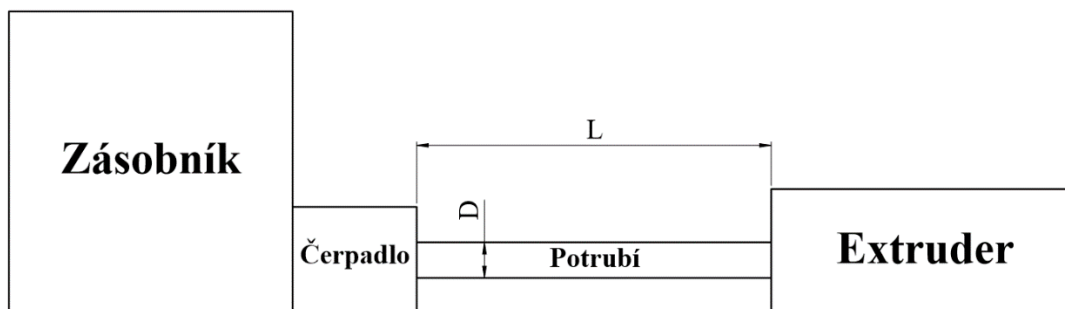
Hustota hmoty $\rho = 1150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Průměr potrubí (poloměr) $D = 100 \text{ mm}$, $R = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$

Jedná se o vysoce viskózní mocninnou kapalinu.

3.2 Schéma soustavy

Soustava je tvořena zásobníkem kolagenní hmoty s vestavěným čerpadlem, dopravním potrubím (zadaných parametrů) a extrudérem, pomocí kterého jsou například plněny formičky.



Obrázek 18 – Schéma soustavy

3.3 Vlastní výpočet

Před začátkem vlastního výpočtu tlakové ztráty je nutné zjistit o jaký druh proudění se v námi zadané soustavě bude jednat. Pokud se bude jednat o proudění laminární, budeme moci bez problému použít zjednodušenou rovnici pro výpočet tlakové ztráty, zmíněnou na začátku kapitoly. V opačném případě, pokud by se jednalo o proudění turbulentní, celý výpočet by nám to značně zkomplikovalo, nicméně v drtivé většině případů, vzhledem ke konzistenci potravinářských gelů je i při vysokých rychlostech toku látky proudění laminární, neboť se zdánlivá viskozita řádově pohybuje od jednotek až po stovky Pa.s. Rozhodujícím faktorem, zdali se jedná o proudění laminární či turbulentní je hodnota Reynoldsova čísla. Pro nás bude stěžejní hodnota kritická, která se pohybuje v okolí $Re = 2300$. Do této hodnoty se jedná o proudění laminární, nad touto hodnotou o turbulentní. Hranice však není přesná, jsou zde přechodové stavy, proto vždy záleží na konkrétním případě a dalších podmínkách. Pro mocninovou kapalinu musíme použít modifikované Reynoldsovo číslo dle Metzner –Reed [3], pro které platí stejné kritické Re jako pro Newtonské kapaliny

$$Re_{MR} = \frac{\rho \cdot \bar{u}^{2-n} \cdot D^n}{8^{n-1} \cdot K} \quad (6)$$

K výpočtu Reynoldsova čísla potřebujeme znát hodnotu střední rychlosti proudění. Tu vypočítáme dle následujícího vztahu (postup výpočtu objemového průtoku uveden níže).

$$\bar{u} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 9,66 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,1^2} = 0,123 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7)$$

Nyní již známe veškeré potřebné informace pro vlastní výpočet Reynoldsova čísla.

$$Re_{MR} = \frac{\rho \cdot \bar{u}^{2-n} \cdot D^n}{8^{n-1} \cdot K} = \frac{1150 \cdot 0,123^{2-0,28} \cdot 0,1^{0,28}}{8^{0,28-1} \cdot 1100} = 6,67 \cdot 10^{-2}$$

Námi vypočtená hodnota $Re = 6,67 \cdot 10^{-2}$ je velmi vzdálená hodnotě kritické, což pro nás znamená možnost bezproblémového užití zjednodušeného vzorce pro výpočet tlakové ztráty při laminárním proudění.

Pro výpočet tlakové ztráty potřebujeme znát objemový průtok potrubím, v námi zadaných hodnotách máme průtok hmotnostní. Je tedy nutné provést jeho převedení. To provedeme dle níže uvedeného vzorce, kde hmotností průtok, vydělíme hustotou dopravované látky.

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{1,11}{1150} = 9,66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 3,48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \quad (8)$$

Výslednou hodnotu již můžeme (samozřejmě ve správných jednotkách) dosadit do vzorce pro výpočet tlakové ztráty v potrubí.

$$\Delta p = \frac{2KL}{R} \cdot \left[\dot{V} \cdot \frac{3 + \frac{1}{n}}{\pi \cdot R^3} \right]^n = \frac{2 \cdot 1100 \cdot 1}{0,05} \cdot \left[9,66 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{3 + \frac{1}{0,28}}{\pi \cdot 0,05^3} \right]^{0,28} = 95912,97 \text{ Pa}$$

Výsledná tlaková ztráta Δp nám po zaokrouhlení vyšla 95913 Pa, což odpovídá 0,96 bar. Tuto hodnotu budeme dále potřebovat při výběru vhodného čerpadla na naše použití. Dále budeme potřebovat hodnotu zdánlivé viskozity. Pro její určení si musíme dopočítat hodnotu rychlosti deformace a napětí na stěně potrubí.

Jako první ze zbývajících hodnot dopočítáme napětí na stěně potrubí. Postupovat budeme dle vzorce:

$$\tau_w = \frac{\Delta p R}{2L} = \frac{95912,97 \cdot 0,05}{2} = 2397,82 \text{ Pa} \quad (9)$$

Pro zjištění hodnoty rychlosti změny deformace využijeme vzorce:

$$\dot{\gamma} = \sqrt[n]{\frac{\tau_w}{K}} = \sqrt[0,28]{\frac{2397,82}{1100}} = 16,17 \text{ s}^{-1} \quad (10)$$

Nyní již máme veškeré potřebné hodnoty pro dopočítání zdánlivé viskozity. Tu můžeme počítat buďto podle vzorce:

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

Také je možné využití vzorce, ve kterém není potřeba znát napětí na stěně trubky.

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} = 1100 \cdot 16,17^{0,28-1} = 148,31 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (12)$$

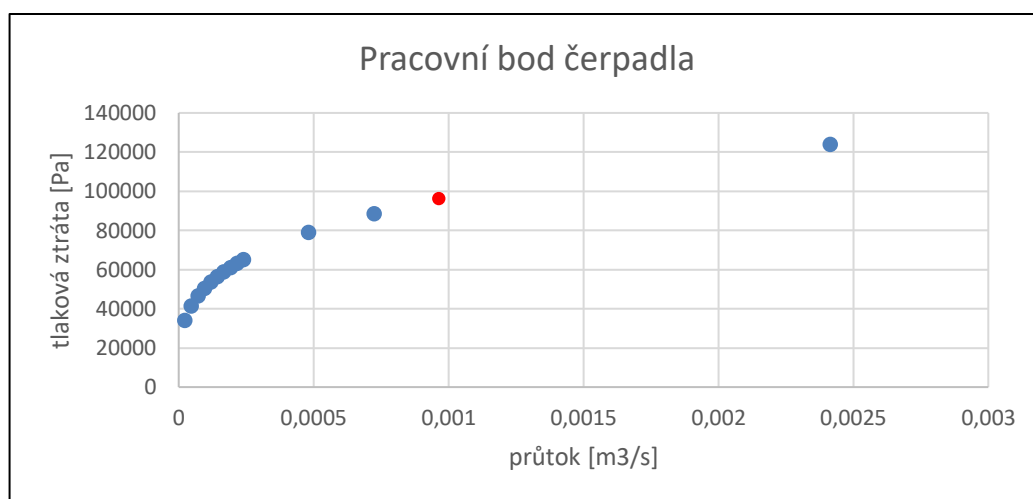
Po dosazení do vzorce jsme získali hodnotu zdánlivé viskozity přibližně 148 Pa.s, což odpovídá hodnotě $\nu = 129000 \text{ cSt}$ [$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], která je u čerpadel, jakožto kinematická viskozita, uváděna některými výrobci čerpadel především z UK a USA. Takto jsme získali druhý parametr, který využijeme při volbě vhodného čerpadla [16].

Pro zajímavost vkládám tabulku s různými hmotnostními průtoky, která je výsledkem jednoduchého programu v Excelu, který jsem vytvořil. Můžeme si všimnout, jaký vliv má tento vstupní parametr na ostatní výsledné hodnoty. Zbylé vstupní hodnoty jsou nezměněny, tudíž odpovídají původnímu zadání. Červeným rámečkem je zvýrazněn řádek s výsledky, pro hmotnostní průtok, který byl dán v zadání.

Tabulka 8 – vliv hmotnostního průtoku na výsledné hodnoty

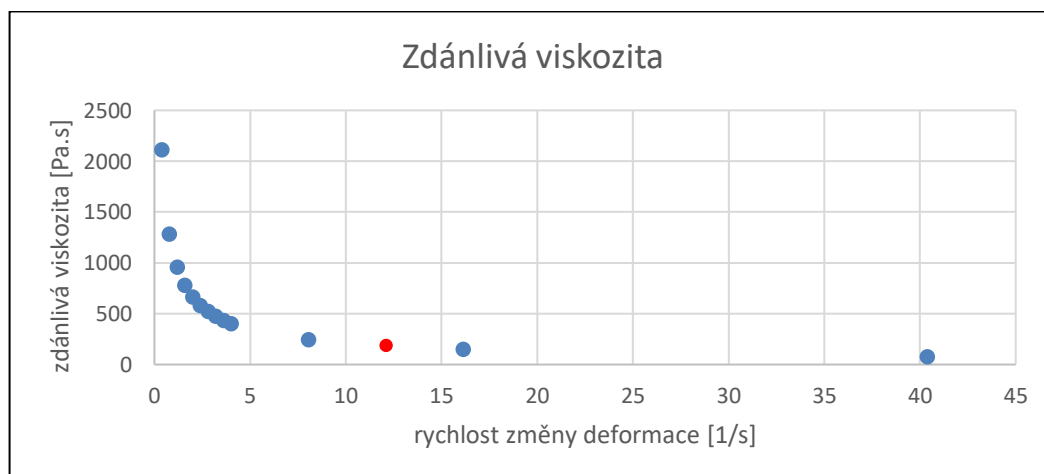
\dot{m} [$\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$]	\dot{m} [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]	\dot{V} [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	\bar{u} [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	Δp [Pa]	τ_w [Pa]	$\dot{\gamma}$ [s^{-1}]	η [Pa.s]	Re [-]
100	2,78E-02	2,42E-05	3,08E-03	34142,9	853,57	0,40	2111,74	1,17E-04
200	5,56E-02	4,83E-05	6,15E-03	41456,1	1036,40	0,81	1282,03	3,86E-04
300	8,33E-02	7,25E-05	9,23E-03	46440,2	1161,01	1,21	957,44	7,75E-04
400	1,11E-01	9,66E-05	1,23E-02	50335,8	1258,40	1,62	778,32	1,27E-03
500	1,39E-01	1,21E-04	1,54E-02	53581,2	1339,53	2,02	662,80	1,87E-03
600	1,67E-01	1,45E-04	1,85E-02	56387,5	1409,69	2,43	581,26	2,55E-03
700	1,94E-01	1,69E-04	2,15E-02	58874,6	1471,87	2,83	520,20	3,33E-03
800	2,22E-01	1,93E-04	2,46E-02	61117,5	1527,94	3,23	472,52	4,19E-03
900	2,50E-01	2,17E-04	2,77E-02	63166,7	1579,17	3,64	434,10	5,13E-03
1000	2,78E-01	2,42E-04	3,08E-02	65058	1626,45	4,04	402,38	6,15E-03
2000	5,56E-01	4,83E-04	6,15E-02	78993,1	1974,83	8,08	244,29	2,03E-02
3000	8,33E-01	7,25E-04	9,23E-02	88490,1	2212,25	12,13	182,44	4,07E-02
4000	1,11	9,66E-04	1,23E-01	95913	2397,82	16,17	148,31	6,67E-02
10000	2,78	2,42E-03	3,08E-01	123965	3099,14	40,42	76,67	3,23E-01

Z našich výpočtů lze získat hydraulickou charakteristiku potrubní sítě. Jedná se o závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku čerpadla. Pracovní bod pro námi zadané hodnoty je zvýrazněn červenou barvou. Graf vychází z hodnot v tabulce 8.



Obrázek 19 – Graf tlakové ztráty závislé na průtoku (pracovní bod čerpadla)

Kromě pracovního bodu je dalším zajímavým grafickým výstupem tabulky 8 závislost zdánlivé viskozity na rychlosti deformace. V grafu můžeme vidět, že s malou rychlostí deformace, potažmo nízkým průtokem, dosahují hodnoty zdánlivé viskozity vysokých hodnot. Se zvyšujícím průtokem se viskozita snižuje a látka se stává lépe čerpatelnou, ovšem za cenu zvyšující se tlakové ztráty. V grafu je červeně označen bod zachycující stav pro námi zadané hodnoty. Z této závislosti vyplývá především problémové uvedení čerpadla do provozu, což se v dnešní době řeší frekvenčním měničem.



Obrázek 20 – Graf zdánlivé viskozity závislé na rychlosti změny deformace

3.4 Výběr vhodného čerpadla

Při výběru vhodného čerpadla musíme brát v potaz více druhů kritérií. Jako hlavní kritéria zvolíme vypočtené hodnoty tlakové ztráty a relativní viskozity, které jsme získali ze vstupních hodnot pro naši soustavu. Dalšími, neméně důležitými kritérii budou mechanický kontakt látky se součástmi čerpadla, pulzace výstupu čerpadla, snadnost čištění.

Mechanický kontakt čerpané látky se součástmi čerpadla může v případě kolagenní (gelovité) látky způsobovat porušení vláknité struktury kolagenu a následné potíže s formováním konečného produktu. Porušená kolagenní struktura nemusí vytvářet homogenní struktury, což v případě naší aplikace znemožní tvorbu kvalitního produktu.

Mírná pulzace výstupu čerpadla pro nás nemusí znamenat větší obtíže. V případě větších pulzací by však k určitým problémům docházet mohlo. Extrudér nebo vstřikovač produktů do formiček potřebuje stabilní přívod látky bez větších výkyvů. Z této podmínky bude vhodné vyřadit silně pulzující čerpadla.

Dalším, neméně důležitým kritériem lze označit snadnost čištění čerpadla po skončení výrobní dávky. Ve výrobním procesu může docházet ke střídání typů čerpaných látek, při nejmenším k různým chuťovým a barevným variantám. Jakékoliv smíchání dvou různými výrobními dávkami je tedy nepřijatelné. I v závodech s neměnnými druhy produktů je snadné čištění stěžejní vlastností čerpadel. Po každé výrobní dávce by mělo dojít k úplnému vyčištění čerpadel, z hygienických a bakteriologických důvodů.

Důležitými postupy pro čištění nejen čerpadla, ale i celé soustavy, jsou CIP a SIP. Zkratka CIP (z anglického: cleaning in place, tedy „čištění na místě“) vyjadřuje možnost čištění soustavy bez nutnosti její demontáže. Celý proces probíhá proplachováním soustavy chemickým čisticím prostředkem při teplotě nejčastěji 50-75°C. Druhým procesem se zkratkou SIP (z anglického: sterilization in place, tedy „sterilizace na místě“) je využíváno jako závěrečné fáze procesu CIP. Mnohdy je tento proces součástí procesu CIP a nejsou vůbec oddělovány. Jedná se o proces sterilizace, nejčastěji horkou parou (teplota přibližně 120 °C), kdy dochází k odstranění všech zbytků mikroorganismů, které by mohli kontaminovat produkt v dalších výrobních dávkách [7] [8].

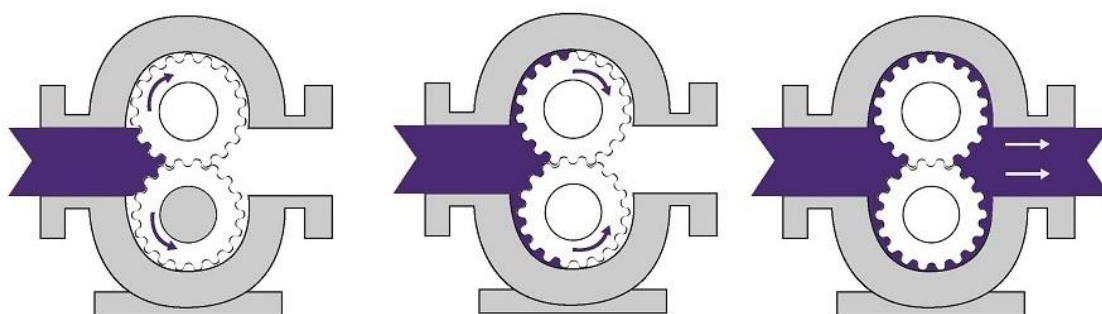
V několika následujících oddílech se podíváme na nejčastěji průmyslově používaná čerpadla v potravinářském odvětví. U každého z nich si vysvětlíme základní princip fungování a uvedeme jejich výhody a nevýhody, potažmo vhodnost pro naše využití. Nakonec zvolíme takové, které při určitých kompromisech, nejlépe splní naše

požadavky. Čerpadla, která principově nevyhovují našim požadavkům, vyloučíme předem (pístové čerpadlo, lopatkové...)

3.4.1 Zubová čerpadla

V rámci zubových čerpadel můžeme najít několik poddruhů (s vnějším ozubením, s vnitřním ozubením, popřípadě speciální druh gerotor). Ve svém přehledu se budeme primárně věnovat základnímu čerpadlu s vnějším ozubením.

Princip: Čerpadlo funguje na principu, kdy je látka čerpána pomocí dvojice ozubených kol.



Obrázek 21 – Princip zubového čerpadla [9]

Výhody čerpadla:

- Plynulý průtok a přesné dávkování bez pulzací
- Málo namáhaných částí
- Široké možnosti využití

Nevýhody čerpadla:

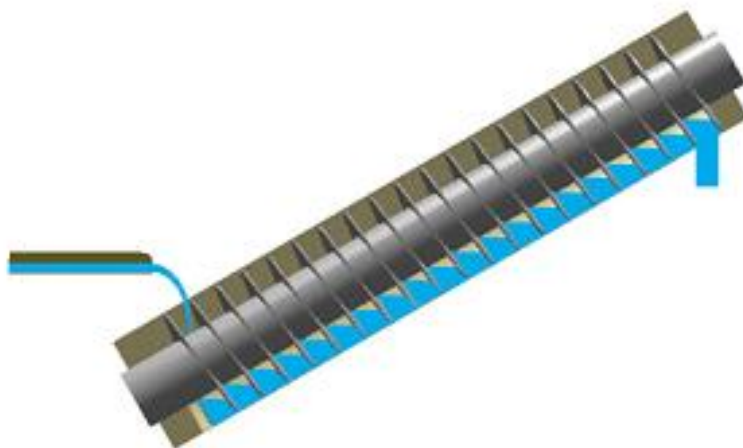
- Čerpaná látka přichází do kontaktu s ostrými zuby
- Spíše pro nižší viskozity
- Přímý kontakt ložisek s čerpanou látkou

Zubové čerpadlo nevolím především z důvodu přímého kontaktu čerpané látky s ostrými částmi ozubeného kola, kdy hrozí poškození struktury čerpaného kolagenu [10].

3.4.2 Vřetenová čerpadla

Vřetenová čerpadla členíme do více poddruhů, a to jak z hlediska použitého druhu vřeten (šroubu): Archimédův šroub, excentrický šnekový rotor, vřetenno obdélníkovým závitem, vřetenno lichoběžníkovým závitem, vřetenno cykloidním závitem. Tak z hlediska počtu použitých vřeten: jedno vřetenová, dvou vřetenová, tří vřetenová. Ve svém přehledu se budeme zabývat základním jedno vřetenovým čerpadlem.

Princip: Látka je dopravována pomocí rotace hřídele šroubovitého tvaru ve statoru. Ten může být tvořen v základním provedení hladkou trubkou.



Obrázek 22 – Princip vřetenového čerpadla [11]

Výhody čerpadla:

- Plynulý průtok, nepulzující výstup
- Mechanicky odolné
- Široké možnosti využití

Nevýhody čerpadla:

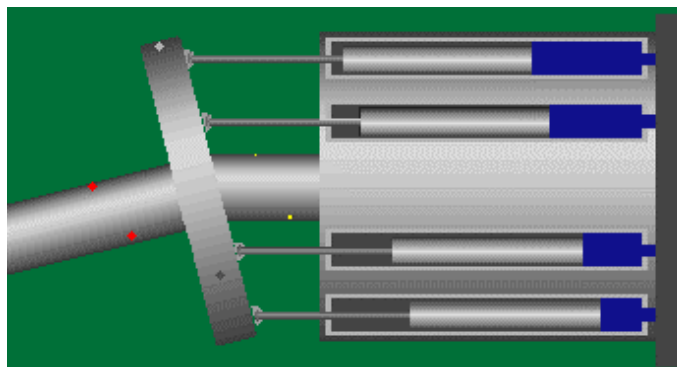
- Velké rozměry čerpadla
- S narůstající viskozitou snižování výkonu
- Možnost poškození čerpané látky

Vřetenové čerpadlo bylo jedním z adeptů na námi požadovanou aplikaci. V konečném zvažování pro a proti jsem se pro dané čerpadlo nerozhodl z důvodu větších zástavbových rozměrů. Dále jsem spatřoval nevýhodu přímého kontaktu čerpané látky na dlouhé kontaktní ploše, tudíž možnost poškození kolagenních struktur, jako v případě zubového čerpadla [11].

3.4.3 Rotační pístová čerpadla

Rotačních pístových čerpadel máme více druhů, základní členění je na axiální a radiální provedení, která se ještě dále dělí. V obou případech je látka čerpána pomocí soustavy pístů, které střídavě pracují a částečně tak kompenzují pulzní charakter pístových čerpadel.

Princip: Látka je čerpána pomocí soustavy pístů (různého počtu), které jsou poháněny pomocí rotujícího hřídele.



Obrázek 23 – Princip Axiálního rotačního čerpadla s šikmo postaveným kotoučem [12]

Výhody čerpadla:

- Velmi vysoké tlaky, možnost i vysoce viskózních látek
- Jednoduchá údržba
- Přesné dávkování

Nevýhody čerpadla:

- Pulzující výstup
- Menší průtoky
- Složitá konstrukce

Rotační pístová čerpadla by za určitých podmínek mohla být vhodnou alternativou pro naši aplikaci. Splňují podmínku čerpat vysoce viskózní látky, existující pulzace výstupu je velmi redukována a svou konstrukcí by neměla poškozovat strukturu kolagenu. Nakonec jsem však našel vhodnější alternativu ve formě rotační lobe pumpy. Ta zvítězila především kvůli své jednodušší konstrukci a lepším čerpacím podmínkám vhodným pro naše využití [12].

3.4.4 Rotační lobe pumpy

Rotačních lobe pump existuje více druhů (rotory se dvěma nebo třemi křídly a spousta jejich modifikací), všechny ale pracují na obdobném principu. Jsou hojně využívány v potravinářském, chemickém, farmaceutickém průmyslu. Jsou schopny čerpat i větší kusky hmoty bez jejího porušení (např. kompoty).

Princip: Fungování čerpadla je velmi podobné principu zubovek s vnějším ozubením (dva rotující díly, vůči sobě v opačném směru, které „posouvají“ čerpaný materiál). Ve zbylých aspektech jsou ale již oba druhy čerpadel naprosto odlišné. U lobe pump nedochází k žádnému kontaktu mezi rotujícími díly navzájem, ani rotujícími díly a tělem čerpadla. To má za následek možnost čerpání látky bez jakéhokoliv poškození (již výše

zmíněná možnost čerpání kompotů). K této výhodě ještě přispívá absence jakýkoliv ostrých součástí nebo hran (na rozdíl od zubových čerpadel).



Obrázek 24 – Princip fungování lobe pumpy (na obrázku se třemi křídly) [13]

Výhody čerpadla:

- možnost čerpání i pevných látek
- nedochází k vzájemnému kontaktu částí
- velmi jednoduché čištění (CIP/SIP)
- průtok přímo úměrný rychlosti otáčení = přesné dávkování
- dobrý nasávací efekt
- stabilní nepulsující výstup
- možnost reverzace chodu
- zachování neporušenosti čerpaného produktu (bez míchání nebo šlehaní kapaliny)
- ložiska hřídelí nejsou v kontaktu s produktem

Nevýhody čerpadla:

- složitější konstrukce – nutné správné časování rotorů
- drahá výroba, tedy i vyšší cena čerpadla
- jen pro nízkotlaké systémy
- větší rozměry
- nižší provozní rychlost pro látky velké viskozity

Pro naši aplikaci jsem zvolil typ rotační lobe čerpadlo. Ze všech druhů čerpadel, která přicházela v úvahu, tento nejlépe splňuje veškeré naše požadavky na čerpací charakteristiky pro námi čerpanou látku. Máme zde nepulzující výstup, neporušení struktury kolagenní látky, snadnou údržbu mezi jednotlivými dávkami [13].

3.4.4.1 Námi zvolené čerpadlo

V předešlém souhrnu čerpadel jsme došli k volbě čerpadla typu lobe pumpa. Pro výběr konkrétního modelu využijeme hodnoty, které jsme dopočítali pro nám zadanou soustavu (zásobník, čerpadlo, potrubí).

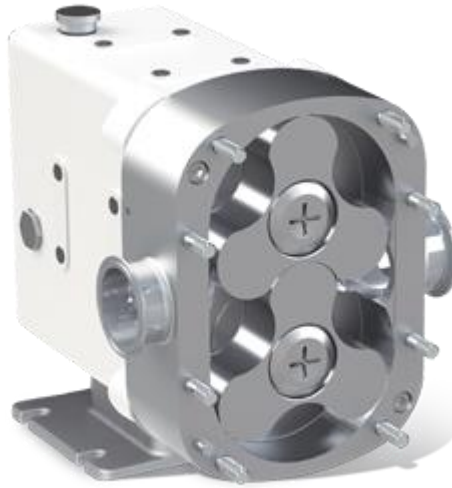
Konkrétní hodnoty, ze kterých budeme vycházet jsou:

- Objemový průtok $\dot{V} = 3,48 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Tlaková ztráta $\Delta p = 95912,97 \text{ Pa} = 0,96 \text{ bar}$
- Zdánlivá/kinematická viskozita $\eta = 148,31 \text{ Pa} \cdot \text{s} / \nu = 129000 \text{ cSt}$

Dle uvedených hodnot budeme vybírat vhodné čerpadlo u výrobce. Já konkrétně zvolím čerpadlo od výrobce Wright Flow Technologies, z důvodu ověřené kvality, velmi širokého sortimentu a přehledného katalogu.

Model čerpadla:

- Čerpadlo typu lobe pumpa s otáčející se trojitou vačkou (piškotové čerpadlo).
- Vyrobené společností: Wright Flow Technologies
- Modelová řada: Revolution
- Model: R0150X



Obrázek 25 – Lobe pumpa výrobce Wright Flow Technologies, řady revolution [14]

Technické specifikace:

- Objemový průtok $\dot{V} = 3,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Tlaková ztráta (maximální) $\Delta p = 15 \text{ bar}$
- Kinematická viskozita (maximální) $\nu = 440000 \text{ cS}$

Výhody:

- Nabízí hygienické možnosti čerpání v potravinářském, nápojovém a farmaceutickém průmyslu a je vhodné pro řadu jiných použití.
- Díky komponentům z nerezové oceli s vysoce kvalitním povrchem jsou zvláště vhodná pro procesy CIP a SIP.

Zvolené čerpadlo naprosto přesně vyhovuje našim vstupním požadavkům. U objemového průtoku jsme blízko hranice maximálního průtoku, což v případě naší aplikace není vůbec na závadu (není plánován vyšší průtok). U ostatních aspektů máme ještě značné rezervy. Vzhledem k dalším charakteristikám považujeme čerpadlo za velmi vhodnou volbu pro naši aplikaci [15].

4 ZÁVĚR

Práce se snaží zodpovědět otázku co je to gel, jaké jsou vlastnosti této látky, jaké je její využití v potravinářském průmyslu a na základě zjištěných informací z literární rešerše, navrhnout vhodné čerpadlo pro zadané provozní parametry jednoduchého dopravního systému. Struktura práce je tedy logicky tvořena teoretickou částí opírající se o literární rešerši a praktickou – výpočtovou částí využívající informací z rešerše a znalostí získaných studiem na FS, ČVUT v Praze.

Cílem teoretické části práce bylo utvoření přehledu gelů využívaných v potravinářském průmyslu. Jsou zde uvedeny jak definice gelové látky, tak jednotlivé skupiny gelů. Dále jsou popsány vznik a podmínky, které jsou pro vytvoření gelů zapotřebí, případně pomáhají modifikovat výsledný gel. Literární rešerše byla také zaměřena na metody a přístroje vhodné k měření charakteristických vlastností gelovité látky, včetně jejich tokových vlastností. Tato část práce byla také zaměřena na příklady jednotlivých gelů, včetně jejich zdrojů a následného využití v potravinářském průmyslu.

Ve výpočetní části práce byl stěžejní úkol nalezení vhodného čerpadla pro zadané využití. K tomu bylo nutné zjištění tlakové ztráty a zdánlivé viskozity při čerpání kolagenní látky zadanou soustavou. Jednalo se o soustavu zásobník se zabudovaným čerpadlem, dopravní potrubí vedoucí do extruderu a extruder. Všechny potřebné parametry pro výpočet byly zadány. Výsledné hodnoty tlakové ztráty a zdánlivé viskozity byly použity k volbě vhodného čerpadla. Při výběru bylo vybráno více vhodných alternativ a ty byly navzájem porovnány. S přihlédnutím ke způsobu využití, bylo nakonec zvoleno čerpadlo typu lobe pumpa. Tento druh čerpadla nejlépe splňoval požadavky pro průmyslové využití, tedy nepulzující výstup, neporušení struktury kolagenní látky, snadnou údržbu.

5 PŘEHLED POUŽITÉHO ZNAČENÍ

D	průměr	[m]
G'	dynamický (elastický) modul	[Pa]
G''	ztrátový (viskózní) modul	[Pa]
G*	komplexní modul	[Pa]
K	koeficient konzistence	[Pa.s ⁿ]
L	délka	[m]
ṁ	hmotnostní průtok	[Pa.s ⁿ]
n	index toku	[-]
Δp	tlaková ztráta	[Pa]
R	poloměr	[m]
Re _{MR}	Reynoldsovo číslo dle Metzger – Reeda	[-]
T	termodynamická teplota	[K]
ū	střední rychlost proudění	[m.s ⁻¹]
V	objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]

ŘECKÁ ABECEDA

γ̇	rychlost smykové deformace	[s ⁻¹]
δ	úhel fázového posunu (ztrátový úhel)	[°]
η	zdánlivá viskozita	[Pa.s ⁻¹]
ν	Kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
τ _w	napětí na stěně potrubí	[Pa]

6 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BANERJEE Soumya & BHATTACHARYA Suwendu (2012) Food Gels: Gelling Process and New Applications, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52:4, 334-346, DOI: 10.1080/10408398.2010.500234
- [2] 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.
- [3] CHHABRA, R. P. a J. F. RICHARDSON. Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. ISBN 07-5068532-8.
- [4] ESHWAR, M. S. Isolation and gel formation of polysacchrides and starch retrogradation. School of Food Technology JNTUK. [online]. [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/eshwar786/isolation-and-gel-formation-of-polysacchrides-and-strach>
- [5] Techniques in molecular biology – agarose gels (Horizontal gel electrophoresis). [online]. [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <http://home.sandiego.edu/~josephprovost/AGAROSE%20GELS.pdf>
- [6] Kolagen – pevnost – integrita – struktura. [online]. [cit. 2018-11-04]. Dostupné z: <https://www.orling.cz/cs/clanky/prof-adam-a-kolagen/kolagen-a-pojivove-tkane/kolagen-pevnost-integrita-struktura.html>
- [7] HOEY, Chris. What is 'Cleaning in Place,' or CIP? How it works, and where you should use it. [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.burkert.com.au/en/Company-Career/What-s-New/News/What-is-Cleaning-in-Place-or-CIP>

- [8] GRIES, Jochen. Are CIP and SIP the same thing – what are the differences? [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://blog.wika.com/knowhow/are-cip-and-sip-the-same-thing-what-are-the-differences/>
- [9] SMELLY, Julietta. How gear pump works? [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.oryxandcrake.co.uk/how-gear-pump-works/>
- [10] VOJÁČEK, Antonín. Principy průmyslových čerpadel – 1.díl – zubová čerpadla. [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-1dil-zubova-cerpadla>
- [11] VOJÁČEK, Antonín. Principy průmyslových čerpadel – 8.díl – vřetenová čerpadla. [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-8dil-vretenova-cerpadla>
- [12] VOJÁČEK, Antonín. Principy průmyslových čerpadel – 5.díl – rotační pístová čerpadla. [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-5dil-rotacni-pistova-cerpadla>
- [13] VOJÁČEK, Antonín. Principy průmyslových čerpadel – 2.díl – rotační Lobe pumpy. [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-2dil-rotacni-lobe-pumpy>
- [14] Produkty, modelová řada Revolution. [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <http://www.wrightflowtechnologies.com/products/revolution/revolution.asp>
- [15] Product catalog. Wright Flow Technologies. [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: http://wft.salesmrc.com/pdfs/WFT-Product_Catalog_WEB.pdf
- [16] Kalkulátor viskozity. [online]. [cit. 2018-12-15]. Dostupné z: <https://www.cactus2000.de/uk/unit/massvis.php>

- [17] LAPČÍK, Lubomír. Gelová forma hmoty jako základ materiálů – inženýrských prvků. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2176-2.pdf>
- [18] MEZGER, Thomas G. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. 3rd rev. ed. Hanover, Germany: Vincentz Network, 2011. ISBN 978-3866308-640.
- [19] Lab instrumenst, ElastoSens X3. [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://www.rheolution.com/elastosens-x3.html>
- [20] Monitoring Gelation of Hydrocolloids. [online]. [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://www.rheolution.com/food-industry.html>
- [21] 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. 2018-12-8].
- [22] 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. 2018-12-8]. ISSN 1745-4603.
- [23] Latinský slovník on-line. [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <http://latinsky-slovník.latinsky.cz/latinsko-cesky/>
- [24] BARTOVSKÁ, Lidmila a Marie ŠÍŠKOVÁ. Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav. Vyd. 5., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-579-X
- [25] SCHRAMM, Gebhard. A Practical Approach to Rheology and Rheometry. Karlsruhe: HAAKE, 1994.