

Využití reologických modelů v potravinářství

Martin Dlabač

Bakalářská práce
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav technologie potravin
akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Dlabač**
Osobní číslo: **T15543**
Studijní program: **B2901 Chemie a technologie potravin**
Studijní obor: **Chemie a technologie potravin**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Využití reologických modelů v potravinářství**

Zásady pro vypracování:

I. Teoretická část

1. Reologie a viskozita.
2. Newtonské a nenevtonské kapaliny.
3. Reologie v potravinářství.
4. Měření viskozity.

II. Praktická část

1. Měření a vyhodnocení vybraných druhů potravin.
2. Diskuze výsledků a formulace závěrů.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

[1] WEIN, Ondřej. Úvod do reologie. Brno: Malé centrum, 1996, 84 s. ISBN 80-238-0928-8.

[2] FIGURA, Ludger O., TEIXEIRA, Arthur A. Food Physics: Physical Properties Measurement and Applications. Berlin, Springer, 2007, 554 p., ISBN 978-3-540-34191-8.

[3] MACOSKO, Christopher W. Rheology: principles, measurements, and applications. New York: Wiley, 1994, 550 s. Advances in interfacial engineering series. ISBN 0-471-18575-2.

[4] JANALÍK, Jaroslav. Viskozita tekutin a její měření [elektronická skripta]. 2010 [cit. 2016-12-30]. Dostupné z:

<http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Janalik-TEXTviskozitaPDF.pdf>.

[5] VLIET, Ton van. Rheology and fracture mechanics of foods. Boca Raton: CRC Press, 2014, 345 s. ISBN 978-1-4398-2703-1.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Mgr. Barbora Lapčíková, Ph.D.

Ústav technologie potravin

Datum zadání bakalářské práce:

2. února 2018

Termín odevzdání bakalářské práce:

3. května 2018

Ve Zlíně dne 2. února 2018



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: MARTIN DLABAČ

Obor: ČHTP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 3.5.2018

Martin Dlabáč

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá využitím reologických modelů v potravinářství. Reologická data jsou velmi důležitá pro výrobu a skladování potravin, ale také pro optimalizaci výrobních zařízení. Byly naměřeny reologické vlastnosti osmi druhů potravin. U slunečnicového oleje, olivového oleje a polotučného mléka bylo zjištěno newtonské chování z viskozitních měření. U pěti potravin bylo zjištěno neneutronské chování, poté byl vyhodnocen nejvhodnější reologický model a popsány jeho parametry. Model Herschel – Bulkley byl nejvhodnější pro kečup jemný, jablečné pyré s banány a Hamánka s kuřetem. Pro zakysanou smetanu a mléčný čokoládový nápoj byl nejvhodnější model Ostwald de Waele.

Klíčová slova: reologie, reologické modely, viskozita, newtonské látky, neneutronské látky

ABSTRACT

This work deals using of rheological models in the food industry. Rheological data is very important for the production and storage of food, but also for the optimization of production facilities. The rheological properties of eight types of food were measured. For three types of food sunflower oil, olive oil, semi-skim milk the Newtonian properties were found. For five foods, non-Newtonian behavior was found, then the best rheological model and its parameters were evaluated. The Herschel - Bulkley model was best suited for ketchup, apple puree with bananas and “Hamánek” with chicken. For sour cream and milk chocolate drink was suitable Ostwald de Waele model.

Keywords: rheology, rheological models, viscosity, Newtonian fluids, non-Newtonian fluids

Chtěl bych poděkovat vedoucí mé bakalářské práce Doc. Mgr. Barboře Lapčíkové, Ph.D. za její ochotu, cenné rady a pomoc při vedení bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat Ing. Tomáši Valentovi a pomoc při měření a vyhodnocování výsledků.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 REOLOGIE A VISKOZITA	11
1.1 VISKOZITA	11
1.2 REOLOGIE	11
2 NEWTONSKÉ KAPALINY	13
3 NENEWTONSKÉ KAPALINY	14
3.1 ROZDĚLENÍ NENEWTONSKÝCH KAPALIN	14
3.1.1 Zobecněné nenevtonské kapaliny	14
3.1 REOLOGICKÉ MODELY V POTRAVINÁŘSTVÍ	16
4 REOLOGIE V POTRAVINÁŘSTVÍ	19
4.1 REOLOGICKÉ VLASTNOSTI POTRAVIN	19
4.1.1 Příklady viskozitního chování kapalin	20
5 MĚŘENÍ VISKOZITY	22
5.1.1 Kuličkový viskozimetr	22
5.1.2 Nízkotlaké kapilární viskozimetry	23
5.1.3 Vysokotlaké kapilární viskozimetry	24
5.1.4 Výtokové pohárky	24
5.1.5 Rotační reometr	25
5.1.6 Další přístroje	26
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
6 CÍLE PRÁCE	28
6.1 MĚŘENÉ POTRAVINY	29
7 VÝSLEDKY A DISKUZE	30
7.1 NEWTONSKÉ KAPALINY.....	30
7.1.1 Slunečnicový olej, výrobce Vegetol	30
7.1.2 Olivový olej extra panenský, výrobce Ballester.....	31
7.1.3 Polotučné mléko 1,5% tuku, výrobce Pradolaktos.....	32
7.2 NENEWTONSKÉ KAPALINY	32
7.2.1 Kečup jemný, výrobce AVE	32
7.2.2 Zakysaná smetana 15% tuku, výrobce Mlékárna Kunín.....	34
7.2.3 Jablečné pyré s banány, výrobce HAMÉ	35
7.2.4 Hamánek, babiččino kuře se zeleninou a rýží, výrobce HAMÉ	37
7.2.5 Mléčný čokoládový nápoj, výrobce Candia.....	38
ZÁVĚR	41
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	46
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK	49

ÚVOD

Reologické chování tekutých materiálů hraje důležitou roli v řadě technologických operací. Využívá se v mnoha oborech, ve stavebnictví, v kosmetice, ale také v potravinářství, čemuž se v této práci budeme věnovat podrobněji.

Znalost základních reologických veličin, jako je viskozita, mez toků, modely pružnosti apod. je velice důležitá. Je potřebná nejen k charakterizování surovin eventuálně produktů, ale i k řešení mnoha technických úloh a výpočtů. Rovněž jsou tyto informace důležité při navrhování, zdokonalování a kontrole výrobních a dopravních zařízení.

Možná právě proto, se reometry a reologická měření staly nezbytnými nástroji v laboratořích celého světa. Pracovníci ve výzkumu a výrobě v současné době spoléhají právě na reologická měření. Ta jsou důležitá i z hlediska konkurenceschopnosti výrobků.

Cílem této práce je vysvětlit, co vlastně reologie je, čím se zabývá, jaká jsou její specifika a kdy vznikla. Práce si také klade za cíl vysvětlit několik základních pojmů, které k této vědě neodmyslitelně patří. Jako jsou např. newtonské a nenewtonské kapaliny apod. Přičemž hlavní důraz bude kladen na využití reologie v potravinářství. Pro představu zde bude uvedeno i několik konkrétních příkladů.

Dalším cílem této práce bylo u vybraných druhů potravin naměřit reologické vlastnosti potravin a vyhodnotit nejvhodnější reologický model.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 REOLOGIE A VISKOZITA

1.1 Viskozita

Základní veličinou reologie je viskozita. Je to fyzikální veličina charakterizující tok kapaliny, což je vnitřní tření částic kapaliny a závisí na přitažlivých silách mezi částicemi. Jinými slovy by se dalo říci, že se určuje stav mezi vnějším odporem a tokem. Na základě druhu zatížení poté dělíme viskozitu na smykovou a elongační. U smykového toku je rychlostní gradient kolmý ke směru toku, při elongačním toku je rychlostní gradient ve směru toku. Viskozita se rovněž dělí dle způsobu měření. A to na dynamickou η a kinematickou viskozitu ν . Platí mezi nimi přímá úměra, koeficient úměrnosti je hustota látky. Dynamická viskozita má jednotku Pa.s. a kinematická $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$. Dynamická a kinematická viskozita se určují měřením pomocí viskozimetrů, pro většinu kapalin lze hodnotu viskozity v závislosti na tlaku a teplotě i v odborné literatuře [1,2].

Výpočet kinematické viskozity:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1)$$

ν - kinematická viskozita

η - dynamická viskozita

ρ - hustota látky

1.2 Reologie

Reologie je nauka o deformaci a toku neneutonských kapalin. Studuje souvislosti mezi různými druhy deformace hmoty a zkoumá příčiny a projevy deformací. Je též známá jako vědní obor mechaniky. Propojuje oblasti plasticity a neneutonských kapalin na základě zjištěných poznatků, že jsou oba typy materiálů pod vlivem smykových napětí trvale deformovány. Reologie se zaměřuje na deformaci a průtok látek [3].

Reologie je rozdělována na makroreologii, zkoumající přetvárné vlastnosti hmotnosti hmoty z komplexního pohledu, a poté na mikroreologii studující přetvárné vlastnosti u jednotlivých částí hmoty [4].

Reologické chování tekutých materiálů hraje stěžejní roli v široké škále technologických operací. Povědomí o základních reologických veličinách, viskozity, meze toku nebo modu-

lů pružnosti je nezbytné jak k charakterizování surovin popřípadě produktů, tak i k řešení určitých technických úloh, inženýrských výpočtů v průběhu navrhování, zlepšování a kontrole jednotlivých výrobních a dopravních zařízení [3,4].

Uplatnění reologie je velmi široké. Uplatňuje se jak v geologii, tak příbuzných vědách. Velké využití skýtá také v technických oborech věnovaných materiálům a jejich deformacím [5].

Původ této vědy je možné hledat ve 20. letech minulého století. První práci, jež se zabývá touto tematikou, uveřejnil Markus Reiner. Dílo neslo označení „Handbuch der Physik“. Dalším významným krokem k propagaci tohoto oboru bylo založení reologické společnosti „The Society of Rheology“. Ta byla založena roku 1929 E. C. Binghamem. Na podporu této vědy byl vydán i časopis „Journal of Rheology“, který pod tímto názvem vychází dodnes. Marcus Reiner byl izraelský vědec a jeden z hlavních představitelů reologie. V roce 1958 mu byla udělena Izraelská cena, což je jedno z nejvyšších izraelských vyznamenání [3,5].

Při svém založení definovala společnost reologii jako nauku o deformaci a tečení látek. Během let se tato definice měnila a zdokonalovala. Mezi známou definici tohoto vědního oboru patří: *„Reologie je materiállová věda, která zkoumá vztah mezi napětím a deformací v látkách nejrůznějšího charakteru, přičemž nevytváří ostrou hranici mezi látkami převážně pevnými a převážně kapalnými. Pro charakterizaci látek vytváří modely složené z elastických, viskózních a plastických členů.“* [5].

Co se týče původu slova reologie, ten můžeme nalézt v řečtině, kde řecké slovo „rheos“ znamená tok a „logos“ vědu. V doslovném překladu znamená slovo reologie „studium toku“ [1].

2 NEWTONSKÉ KAPALINY

Viskozitu kapaliny vystavené smyku mezi dvěma rovnoběžnými deskami, z nichž jedna se vzhledem k druhé pohybuje ve své rovině rovnoměrným přímočarým pohybem, se definuje Newtonovým zákonem. Tento vztah je vyjádřen reologickou rovnicí, jež je charakterizována přímou úměrností smykové rychlosti γ a smykovým napětím τ . U těchto látek se viskozita s časem nemění. To znamená, že viskozita je nezávislá na době a velikosti působení smykového namáhání [2,3].

Newtonskými látkami jsou například voda, mléko, rostlinné oleje a plyny. Tento vztah je vhodný především k popisu tekutin neboli newtonských látek, u kterých platí Newtonův zákon mezi smykovým napětím, viskozitou a smykovou rychlostí. Dynamická viskozita je zde koeficient úměrnosti [2,6].

Newtonův zákon:

$$\tau = \eta \cdot \gamma = \eta \cdot \frac{du}{dx} \quad (2)$$

τ - smykové napětí

η - dynamická viskozita

γ - rychlostní gradient neboli rychlost smykové deformace [s^{-1}], je dána poměrem $\frac{du}{dx}$,

kde u je rychlost pohybu jedné roviny vzhledem ke druhé rovině a x je souřadnice kolmá k těmto rovinám [6].

3 NENEWTONSKÉ KAPALINY

Hlavním předmětem studia reologie jsou nenevtonské kapaliny. Jsou to takové látky, kde rychlost smykové deformace není úměrná smykovému napětí. Jedná se o nelineárně viskózní látky. V tomto případě, na rozdíl od newtonských kapalin, neplatí Newtonův zákon viskozity. U nenevtonských látek se, na rozdíl od newtonských látek, viskozita s časem mění [1,7].

Newtonské látky lze popsat následujícím vztahem, který je analogický k Newtonovu zákonu [7].

$$\tau = \eta_a \cdot \gamma \quad (3)$$

τ - smykové napětí

η_a - zdánlivá viskozita

γ - smyková rychlost, rychlost smykové deformace

Zdánlivá viskozita se vyjadřuje jako poměr okamžité hodnoty smykového napětí a smykové rychlosti [8].

3.1 Rozdělení nenevtonských kapalin

3.1.1 Zobecněné nenevtonské kapaliny

První skupinou nenevtonských kapalin jsou tzv. zobecněné nenevtonské kapaliny, které se dále dělí do několika podskupin.

Viskoplastické kapaliny

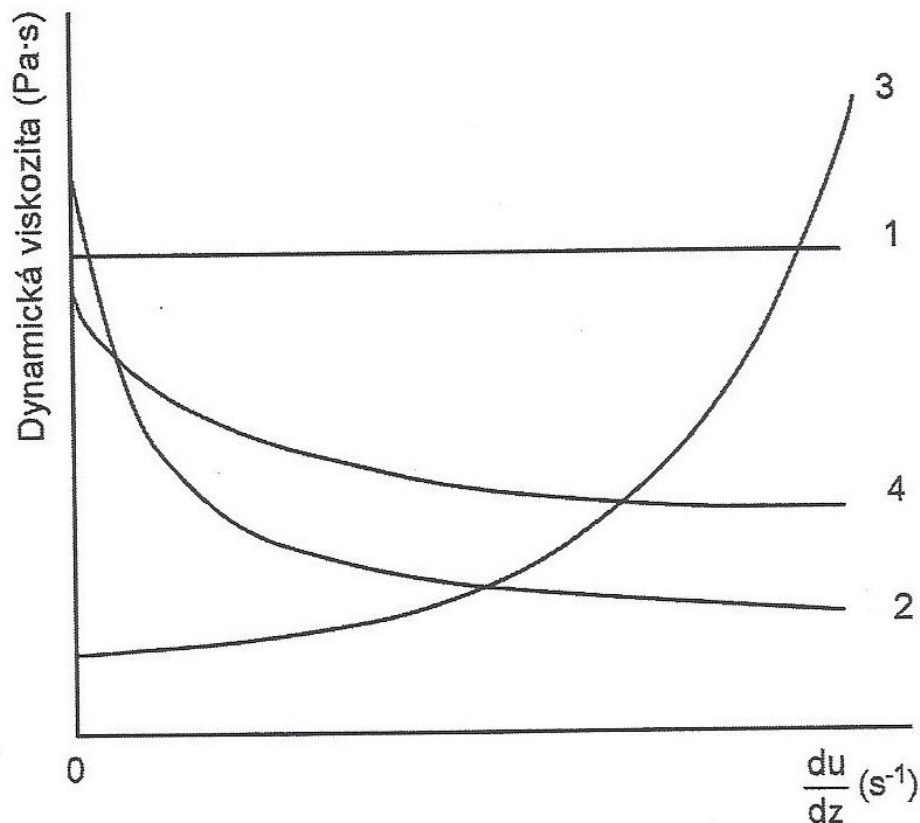
Tyto kapaliny se vyznačují tím, že tečou až od určité hodnoty smykového napětí. Do té doby se chovají jako tuhé těleso. Hodnota smykového napětí, při které začne látka téci, se nazývá mez toku τ_0 . Patří sem např. jogurty, majonézy, emulgované a ztužené tuky koncentrované průmyslové a odpadní kaly, kašovité suspenze, křídly a vápna apod. [6,7].

Pseudoplastické a plastické kapaliny

Pseudoplastické a plastické tekutiny závisí na tom, že viskozita klesá se zvyšující se rychlostí smykové deformace. Pseudoplasticita je technologicky výhodná, protože snižuje energetickou náročnost při míchání a toku kapalin potrubím. Jsou to např. kečupy a taveniny polymerů, roztoky mýdel a detergentů [6].

Dilatantní kapaliny

V tomto případě viskozita roste se zvyšující se rychlostí smykové deformace. Toto chování je poměrně vzácné. Dilatance je naopak oproti pseudoplasticitě technologicky nevýhodná, protože zvyšuje energetickou náročnost míchání a dalších procesů. Dilatantní chování bylo pozorováno v některých vysoce koncentrovaných suspenzích. Například suspenze kukuřičného škrobu nebo v PVC plastizolech [9,10].



Obr. 1: Závislost dynamické viskozity na rychlosti smykové deformace.

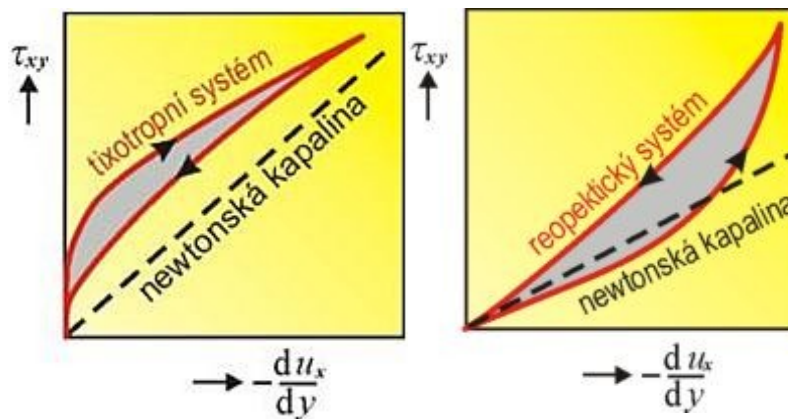
1 – newtonská kapalina, 2 - pseudoplastická, 3 – dilatantní, 4 – plastická

Nonnewtonské tekutiny s časově závislými reologickými vlastnostmi jsou následující:

Tixotropní – zde s rostoucím časem působení smykového napětí zdánlivá viskozita klesá. Z tohoto důvodu se těmto látkách také říká řidnoucí. Je-li tixotropní látka ponechána v klidu, zdánlivá viskozita se vrátí na původní vysokou hodnotu. Tixotropii může způsobovat obsah látek mající vysokou molekulovou hmotnost [7,11].

Reopektické – reopektické tekutiny fungují na opačném principu, kdy s dobou působení napětí viskozita roste. Reopexní tekutinou je např. sádra smíšená s vodou. Je-li v klidu, zůstává celkem dlouhou dobu vláčná. Pokud je tomu naopak a se směsí se pohybuje, pak i rychleji tuhne. Takto se chovají i některé druhy plastů, jež se používají ve stavebninách, v opravárenství apod. [7,11].

Tixotropní a reopektické materiály ve výše uvedeném pořadí snižují a zvyšují smykové napětí. Tixotropní materiály jsou ve srovnání s reopektickými časově závislé méně. Oba jevy mohou být ireversibilní, reversibilní nebo částečně reversibilní. Tixotropie je spojena s časově závislým poklesem viskozity [11].



Obr. 2: Chování tixotropních a reopektických látek v porovnání s newtonskou kapalinou, na obrázku je popsána závislost mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí [12].

3.1 Reologické modely v potravinářství

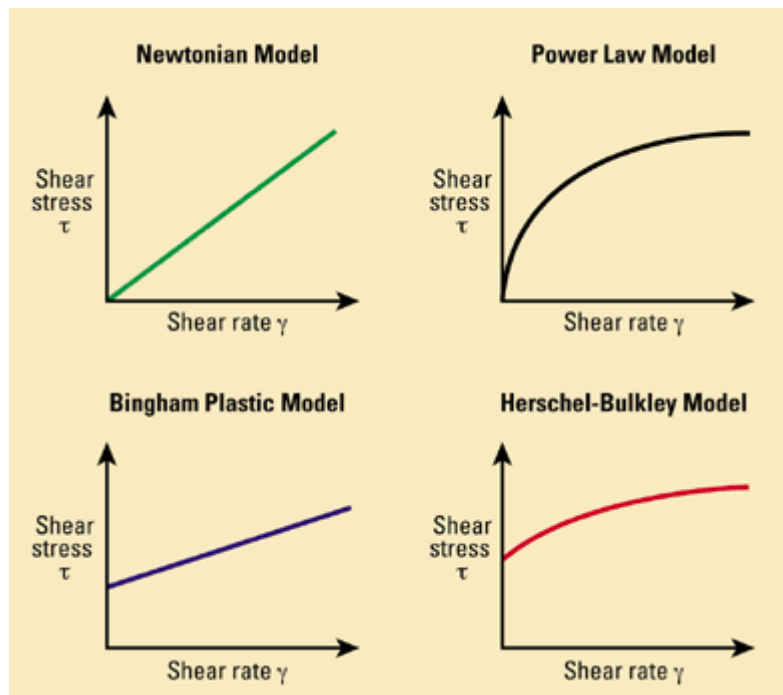
Reologické chování látek lze popsat několika následujícími reologickými modely. Jsou to vztahy mezi smykovým napětím τ a smykovou rychlostí γ . Binghamův model vyjadřuje chování viskoplastických látek. Pomocí modelu Oswald de Waele, který se nazývá

také jako Power law, nebo-li mocninový model, lze popsat látky dilatantní a pseudoplastické. Pokud je index tokového chování n větší než 1, látka je dilatantní a pokud je index tokového chování naopak menší než 1, jedná o látku pseudoplastickou. V případě, že je index tokového chování roven 1, přechází tento vztah na Newtonův zákon. Model Herschel - Bulkley oba předchozí modely kombinuje a slouží k popisu plastických látek. Cassonovým modelem lze také popsat chování viskoplastických látek. Používá se také k charakterizaci disperzních soustav v potravinách a také k charakterizaci tokových vlastností čokolád. Reologickým modelem Ellis lze také popsat chování neneutonských kapalin. Pokud je podíl $\frac{\tau}{\tau_{0,5}}$ větší než 1, lze tento model zjednodušit na model Oswald de Waele [6,13,14].

Tab. 1: Přehled reologických modelů

Název modelu	Model	Legenda
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_a \cdot \gamma$	τ - smykové napětí τ_0 – mez toku η_a – zdánlivá viskozita γ – smyková rychlost
Oswald de Waele (mocninový)	$\tau = K \cdot \gamma^n$	τ - smykové napětí K – součinitel konzistence n – index tokového chování $n > 1$ – látka je dilatantní $n < 1$ – látka je pseudoplastická
Herschel - Bulkley	$\tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n$	τ - smykové napětí τ_0 – mez toku K – součinitel konzistence γ – smyková rychlost n – index tokového chování
Casson	$\tau^{0,5} = \tau_0 + \eta \cdot \gamma^{0,5}$	τ - smykové napětí

		τ_0 – mez toku η - viskozita γ – smyková rychlost
Ellis	$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{0,5}}\right)^{\alpha-1}}$	η – viskozita η_0 - počáteční viskozita τ - smykové napětí $\tau_{0,5}$ – smykové napětí vyjádřené jako $\frac{\eta_0}{2}$ α - parametr



Obr. 3: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u jednotlivých reologických modelů [15]

4 REOLOGIE V POTRAVINÁŘSTVÍ

Z vědeckého hlediska zaujímá reologie široké pole působnosti. Využívá se např. v geologii, k výrobě plastů, ale i ve stavitelství. Dále pak v půdní mechanice, ve výrobě maziv a olejů, k výrobě kosmetiky a v bioinženýrství apod. V neposlední řadě se využívá i v potravinářství, což je předmětem této bakalářské práce. I potraviny jsou totiž komplexní materiály, složené z pevných i kapalných komponentů. Reologie zde nachází uplatnění v optimalizování znaků v rozvoji produktů, ale i v dodržení výrobního postupu a v ovlivnění jakosti finálních výrobků [3,16].

Její využití je vskutku značné. Využívá se při výrobě, kde ovlivňuje především vybavení potravinářského podniku, dále pak ovlivňuje kvalitu meziproductů a finálních výrobků, ale také určuje funkční závislost přísad v rozvoji produktů. Rovněž ovlivňuje dobu skladovatelnosti, má vliv na hodnocení textur ve vztahu k smyslovému vnímání a v neposlední řadě určuje stavové rovnice reologických analýz a vyhodnocení [16].

4.1 Reologické vlastnosti potravin

Reologické chování potravinářských materiálů se přímo odráží od jejich texturních vlastností. Pod pojmem reologické vlastnosti se skrývají vlastnosti látek mající vliv na změnu tvaru a tok látek. Reologické vlastnosti jsou stěžejním faktorem při navrhování zařízení určených k přepravě, čerpání a v neposlední řadě skladování potravin. Reologie je také provázána s prováděním kontroly kvality a sensorických vlastností potravin. Textura zahrnuje konstrukční prvky a způsoby, jak jsou sensorické vlastnosti potravin vnímány. Veškeré reologické i strukturální vlastnosti potravin vnímají lidské receptory. Jedinec konzumující potraviny je součástí hodnocení např. tvrdosti ovoce na základě deformace, jelikož je tlakem jeho ruky nebo prstů ovlivněna jeho deformace [17].

Stěžejní význam mají reologické vlastnosti v průběhu výroby, skladování a spotřeby nejen především u drtivé většiny kapalin, avšak také i u mnoha ostatních potravin. Tyto vlastnosti jsou ovlivňovány jak smykovou a elongační viskozitou, a také elasticitou a mezí toku, kdy jejich velikost se odráží od způsobu zacházení, době a teplotě. Následně jsou tyto vlastnosti ovlivňovány několika dalšími důležitými parametry. Mezi ten nejdůležitější patří chuť, poté nelze opomenout také vliv zpracovatelnosti a sedimentaci [18].

Velmi významnou roli v reologii hraje samozřejmě viskozita. Její důležitost spočívá v tom, že má vliv na spotřebu energie, ať se jedná o jakýkoliv proces dopravy kapalin -

čerpání nebo míšení. U většiny kapalin není viskozita konstantní, konstantní není ani při totožné teplotě a její kolísavost také ovlivňuje závislost na smykové rychlosti [2].

Mezi velmi důležité faktory patří také elasticita kapalin, která má vliv na spotřebu potravin, tento vliv se projevují tím, že působí v ústech chuťový vjem. V ústech vysoce elastické kapaliny působí zcela odlišně ve srovnání s kapalinami mající zanedbatelnou viskozitou [16].

Reologické parametry ovlivňuje široká škála faktorů, mezi které patří např. vnější prostředí, určitá teplota nebo také způsob manipulace. Obecně jsou reologické vlastnosti řízeny strukturou, jenž je na mikroskopické úrovni. V případě, že nastane situace a dojde k nesprávné manipulaci, důsledky mohou být katastrofální. Následkem může být např. to, že nemusí nastat obnova kapaliny po smykovém namáhání, a tato díky tomu, že tento proces vyžaduje velmi dlouhou dobu [18,19].

Velice důležitým faktorem je rovněž teplota mající vliv na viskozitu, pro spotřebu platí to samé. Teplota rovněž ovlivňuje nejen texturu, ale také chuťové vlastnosti, kdy textura i chuťové vlastnosti patří mezi parametry, na které je třeba brát ohled ke konečné spokojenosti a požadavkům spotřebitele [18].

Konzistence potravinářských produktů je různorodá, od tuhé přes polotuhou až k tekuté. Objektivní, exaktní a především rychlé stanovení konzistence potravinářských výrobků nám umožňuje reologie. Ta nám rovněž umožňuje monitorovat a optimalizovat výrobní procesy [18].

4.1.1 Příklady viskozitního chování kapalin

Čokoláda

Stanovení reologických vlastností čokoládových plev je mezinárodně normováno. Dominují zde dva technologicky důležité parametry. Prvním z těchto parametrů je mez toku a druhým plastická viskozita. Ty se dají určit při teplotě 40°C a v rozsahu smykových rychlostí $\gamma = 5 \text{ s}^{-1}$ až 50 s^{-1} . Vyšší viskozita a zároveň nižší smyková rychlost znamená, že čokoláda bude lépe držet tvar a bude odolnější. [20,21].

Mléko a mléčné výrobky

Viskozita mléka značně závisí na jeho teplotě. Při 80°C je zhruba pětkrát nižší, než při 20°C. Je také možné si povšimnout velkého množství studií, prací, které jsou věnované

reologii jogurtů. V těchto pracích je také možné se dočíst, že textura má značný vliv na jejich užité hodnoty. Vzhledem k jejich viskoplasticitě a náchylnosti ke skluzu po stěně měrných elementů je nutno využít rýhovaných měrných elementů. K tomuto účelu se využívá převážně souosých válců, případně rotorů ve tvaru míchadla. Ale také nedestruktivních dynamických testů [20,22].

Škroby

Škroby jsou jednou z oblastí, kde má tato věda zásadní význam. Uplatňuje se totiž ve všech fázích výroby již od izolace škrobu ze suroviny, až po výrobu modifikovaných škrobů, škrobových hydrolyzátů a dextrinů i při jejich aplikaci v navazujících technologiích. Škrob je typickým zástupcem pseudoplastického chování, kdy se zvyšující se smykovou rychlostí viskozita klesá. Vzhledem k tomu, že reologické vlastnosti jsou poměrně komplikované, při měření se přechází od empirických metod k reometrům [21,23].

Ovocné džusy

Snahou všech výrobců džusů neboli ovocných šťáv je, aby vykazovaly tyto džusy stejnou viskozitu jako ty přírodní. K tomuto účelu je využíváno různých typů zahušťovadel, nejčastěji na bázi derivátů celulózy. Ty zvyšují viskozitu disperzního prostředí a tím omezují sedimentaci dřeně. Nevýhoda těchto zahušťovadel spočívá v tom, že nezvyšují pouze viskozitu, ale také viskoelasticitu, která neblaze působí na chuťové pohárky spotřebitelů [24].

Další výrobky

Existuje celá řada dalších potravinářských výrobků, u kterých hrají reologické vlastnosti významnou roli. Namátkou lze jmenovat kečupy, ale i majonézy, těsta, nejrůznější omáčky a dresinky, ale i celou řadu masových výrobků.

Texturu finálních výrobků samozřejmě ovlivňují i suroviny, jež jsou použity. Znalost reologických vlastností je nezbytná, jelikož i velmi malé přísady určitých látek, jako škrobů, derivátů celulózy atd., výrazným způsobem ovlivňují užité hodnoty [24].

5 MĚŘENÍ VISKOZITY

Reologické vlastnosti látek se měří nejčastěji na zařízeních zvané viskozimetr a reometr. Existuje jich mnoho druhů a pracují na různých principech.

5.1.1 Kuličkový viskozimetr

Princip je založen na rozdílné době pádu kulového tělíska v různých kapalinách. Tento typ viskozimetru využívá platnosti Stokesova zákona při laminárním obtékání kuličky. Stokesův zákon platí pro newtonské kapaliny. Při laminárním proudění se kapalina pohybuje ve vrstvách a nemísí se [1, 25].

Stokesův zákon:

$$\eta = \frac{2}{9} * \frac{(\rho_{kul.tělíska} - \rho_{kapaliny})}{v} * g * r^2 \quad (4)$$

v - rychlost pádu kulového tělíska

r - poloměr kulového tělíska

Na tomto principu je založen například Höpplerův viskozimetr, ten je určen pro stanovení dynamické viskozity z času pádu kuličky trubici se sklonem 10° ve viskózní kapalině. Na padající kuličku o poloměru r působí v kapalině o hustotě ρ tíha, zmenšená o vztlakovou sílu. Hmotnost kuličky, její hustota a rozměry jsou udány výrobcem. Při měření je třeba znát poloměr kuličky, určit vzdálenost dvou rysek na válci naplněném měřenou kapalinou a změřit dobu pohybu kuličky po dráze stanovené těmito ryskami. Dále je nutno určit hustotu kapaliny v trubici viskozimetru a teplotu kapaliny. Výpočtem z naměřených a tabelovaných hodnot je pak stanovena dynamická viskozita kapaliny. Měří se doba, kdy propadne kulička trubici se sklonem 10° . Na tělísko působí síla gravitační, vztlaková a odpor prostředí.

U těchto zařízení je možno měřit velmi širokou škálu viskozit. Jejich nevýhodou je špatná údržba a možné použití jen transparentních vzorků známé hustoty [26,27].

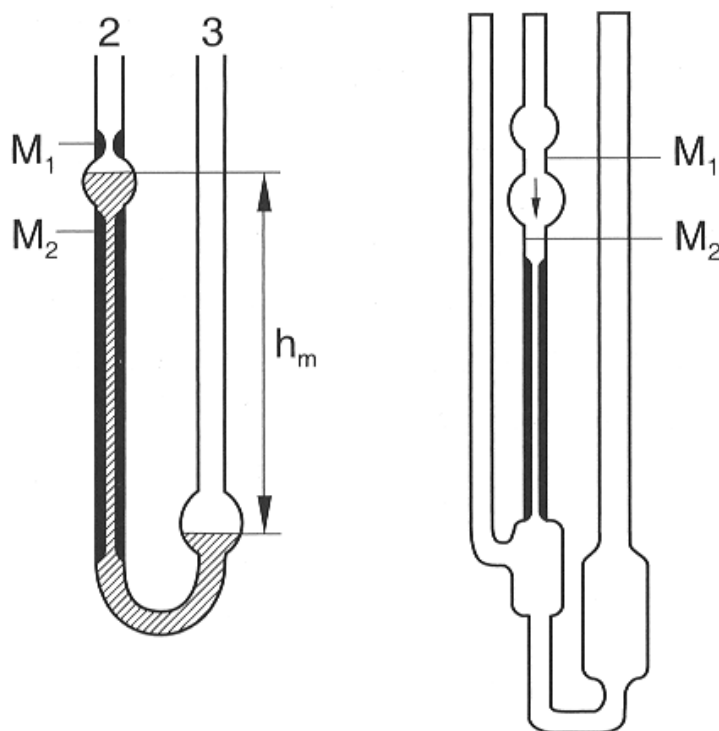


Obr. 4: Höpplerův viskozimetr [28]

5.1.2 Nízkotlaké kapilární viskozimetry

Princip zařízení je založen na měření času, za který proteče definovaný objem kapaliny mezi dvěma ryskami kapiláry se známým vnitřním průměrem. Čas, který kapalina potřebuje k průtoku mezi ryskami, se měří a z něj se vypočítá kinematická viskozita. Hnací silou je tohoto zařízení je gravitace, ta způsobuje smykové napětí a díky tomu kapalina teče. Při měření na kapilárních viskozimetrech dostáváme pouze jednu hodnotu viskozity odpovídající daným podmínkám měření [25,26].

Ve skutečnosti se však rychlost smykové deformace mění v určitém intervalu v závislosti na klesajícím množství kapaliny, která už protekla viskozimetrem, proto by se tato metoda měla používat pouze pro nízko viskózní kapaliny. Existují různé typy kapilárních viskozimetrů. Například Ostwaldův, který má tvar skleněné nádoby ve tvaru písmene U se dvěma ryskami, mezi kterými protéká kapalina, nebo například Ubbelohdeho viskozimetr, který je už o něco složitější, ale také pracuje na stejném principu [26,27].



Obr. 5: Ostwaldův a Ubbelohdeho kapilární viskozimetry se znázorněnými ryskami [1]

5.1.3 Vysokotlaké kapilární viskozimetry

U vysokotlakých kapilárních viskozimetrů je tlak potřebný k tvorbě smykového napětí způsoben vnější působící silou. To je většinou píst, který protlačuje kapalinu kapilárou. Průtokem kapaliny kapilárou se vytváří tokový profil [1,26].

Základními veličinami při měření jsou objemový průtok, teplota a tlakový rozdíl po délce kapiláry. Ten je definován jako rozdíl tlaků na počátku kapiláry v zásobníku a atmosférického tlaku na konci kapiláry. Používají se kapiláry o délce 5 – 60 mm a o průměru 0,5 – 5 mm. Nevýhodou těchto zařízení je jejich velmi vysoká cena. Tyto viskozimetry se používají při měření reologických vlastností vysoce viskózních tavenin, koncentrovaných roztoků a disperzí. [1,27].

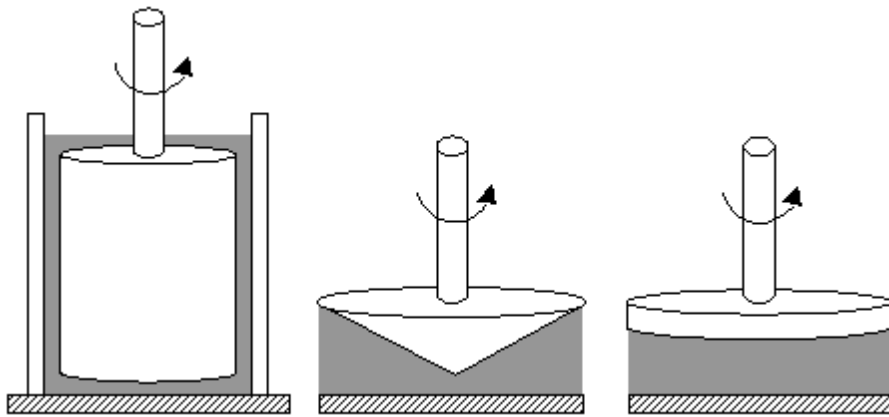
5.1.4 Výtokové pohárky

Tímto velmi jednoduchým zařízením lze měřit viskozitu pouze kapalných vzorků. Měří se doba výtoku dané kapaliny kapilárou, která je umístěná na dně výtokového pohárku. Kapilára má různé průměry otvorů (3 mm, 4 mm, 5 mm a 6 mm) a z doby výtoku kapaliny se poté podle pro každý průměr otvoru daného vztahu vypočítá kinematická viskozita ν . Pro účelné měření musí pohárky odpovídat ISO standardům [1,25].

5.1.5 Rotační reometr

Rotační reometry jsou jedny z nejrozšířenějších zařízení určených k měření viskozity. Kromě viskozity umožňují určit i jiné reologické veličiny, například smykové napětí a rychlost smykové deformace. Přímými měřitelnými veličinami u rotačních viskozimetrů je úhlová rychlost ω nebo počet otáček za čas ustáleného pohybu jednoho z válců a dále údaje o odporu kapaliny proti smykovému namáhání v důsledku vzniku gradientu rychlosti. Tento odpor se projevuje jako kroutící moment, kterým se jeden z válců přístroje brání proti pohybu přenášeného kapalinou z druhého válce. Skládají se ze dvou hlavních částí geometrie. První část je statická – stator a druhá část je pohyblivá – rotor, mezi oběma částmi je zkoumaná kapalina [1,26]

Obě části geometrie pracují ve třech základních konfiguracích válec – válec, kužel – deska, deska – deska [1].



Obr. 6: Druhy geometrií rotačního reometru: válec – válec, kužel – deska a deska – deska [1]

Každá geometrie se využívá pro jiný typ měření a pro jinou konzistenci zkoušených materiálů. Geometrie válec – válec je vhodná pro nízkoviskózní tekutiny, geometrie kužel – deska se používá pro viskózní tekutiny a homogenní materiál, deska – deska je vhodná pro středně viskózní tekutiny a nehomogenní látky. Podle toho, která část geometrie se pohybuje, dělíme měření na dva druhy – Couethův, u něhož se pohybuje vnější část a Searlův, u něhož se pohybuje vnitřní část geometrie. Nejrozšířenější jsou rotační reometry typu Brookfield, u něhož se do kádinky (statoru) se vzorkem ponoří rotor a podle již známého principu se určí viskozita [1,26].

5.1.6 Další přístroje

Bostwickův konzistometr se používá na měření reologických vlastností omáček a dochucovadel, například hořčice a kečupu. Pracuje na principu nakloněné roviny, na které se následně odečte dráha, kterou kapalina urazí za 30 s [25].

Dalším přístrojem je farinograf, který se používá na měření smykového napětí a viskozity směsi vody a mouky. Tímto zařízením se určí množství vody, které absorbuje mouka, aby se dosáhlo optimální konzistence těsta. Tyto informace mají velký význam pro mlynáře a pekaře [25,29].

Na podobném principu pracuje také extensiograf, který také měří reologické vlastnosti těsta. Vyhodnocuje jeho elastické vlastnosti, protahovatelnost a odpor k protahování [21,25].



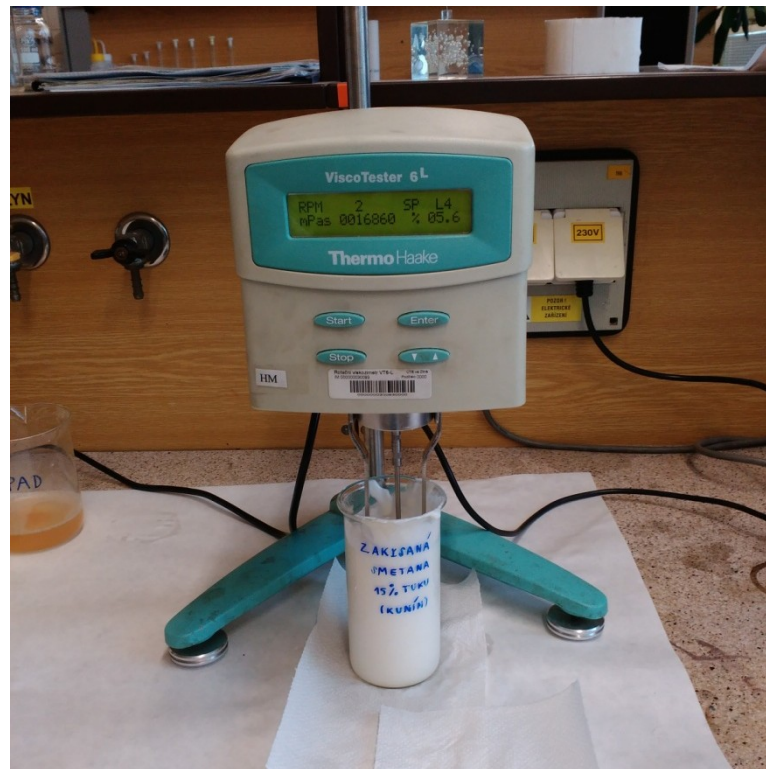
Obr. 7: Extensiograf při vyhodnocování protahovatelnosti těsta [21]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE PRÁCE

Byly měřeny reologické vlastnosti 8 druhů potravin. Měření probíhalo na rotačním viskozimetru Thermo Haake VT 6L. Měření probíhalo vždy nejprve při zvyšujících se otáčkách (UP) a následně při snižujících (DOWN) se otáčkách cívky viskozimetru. Pouze viskozita polotučného mléka byla měřena na Ubbelohdeho viskozimetru.

Na naměřená data byly aplikovány (kromě mléka) reologické modely Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley a Bingham. Nejvhodnější reologický model pro daný výrobek byl vyhodnocován pomocí počítačového programu *SigmaPlot* na základě nejvyššího koeficientu determinace R^2 .



Obr. 8: Rotační viskozimetr Thermo Haake VT 6L

6.1 Měření potravin

Newtonské:

- Slunečnicový olej, výrobce Vegetol
- Olivový olej, výrobce Ballester
- Polotučné mléko 1,5% tuku, výrobce Pragolaktos
- Mléčný čokoládový nápoj, výrobce Candia

Nenewtonské:

- Kečup, výrobce AVE
- Zakysaná smetana 15% tuku, výrobce Mlékárna Kunín
- Dětská přesnídávka jablko, výrobce HAMÉ
- Hamánek s kousky kuřete, výrobce HAMÉ

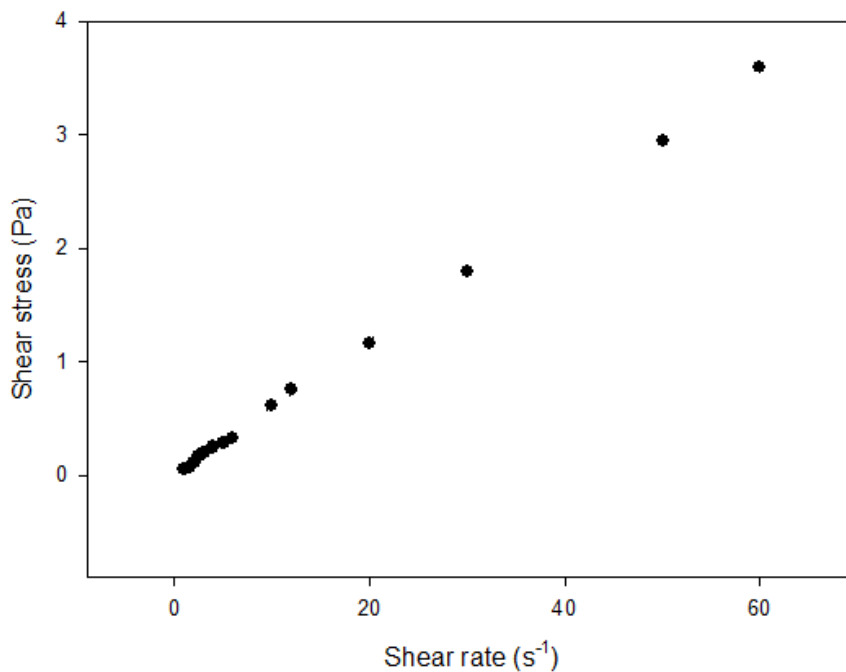
7 VÝSLEDKY A DISKUZE

7.1 Newtonské kapaliny

7.1.1 Slunečnicový olej, výrobce Vegetol

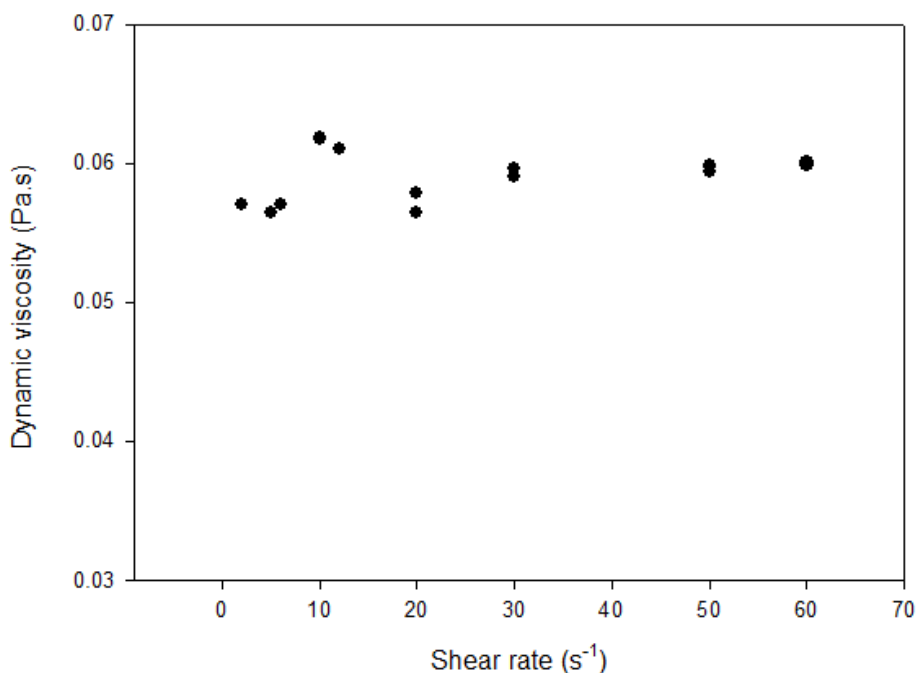
Byla naměřena viskozita komerčně zakoupeného slunečnicového oleje při teplotě 24°C.

Z grafu závislosti mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) při snižujících se otáčkách válce viskozimetru jasně vyplývá, že slunečnicový olej je newtonská kapalina (Obr. 9).



Obr. 9: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u slunečnicového oleje

V grafu závislosti dynamické viskozity a smykové rychlosti se naměřené hodnoty liší jen velmi málo, z čehož je také zřejmé, že slunečnicový olej je newtonská kapalina (Obr. 10) a hodnota dynamické viskozity tohoto výrobku byla $59,1 \pm 2,2$ mPa.s.

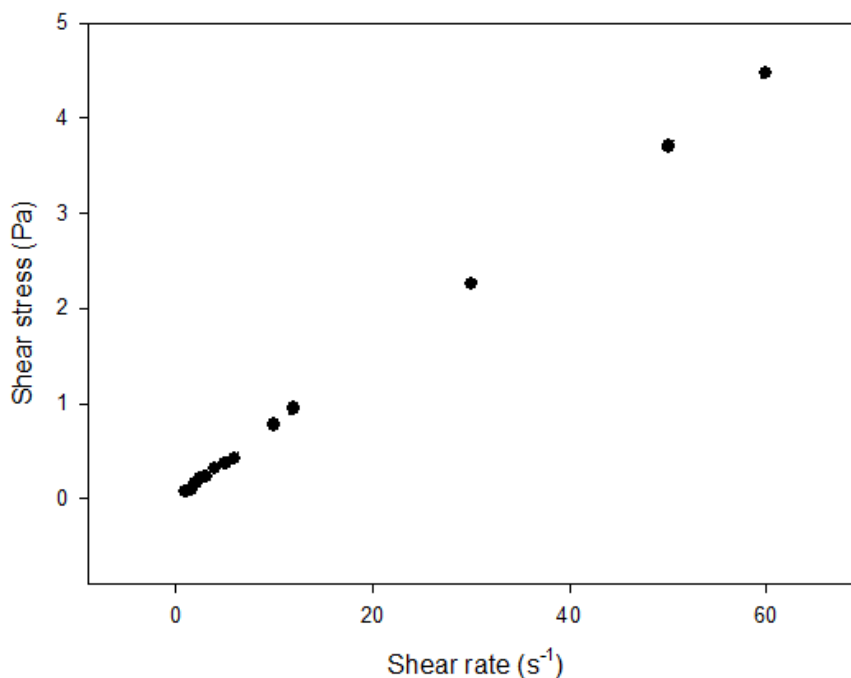


Obr. 10: Závislost mezi dynamickou viskozitou (dynamic viscosity) a smykovou rychlostí (shear rate) u slunečnicového oleje

7.1.2 Olivový olej extra panenský, výrobce Ballester

Viskozita olivového oleje byla měřena také při teplotě 24°C a její hodnota byla $74,6 \pm 2,1$ mPa.s. Z měření tedy vyplynulo, že olivový olej má mírně vyšší viskozitu, než slunečnicový. Vyšší viskozitu má proto, že obsahuje vyšší množství nenasycených mastných kyselin, než olej slunečnicový.

Z grafu závislosti mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) při zvyšujících se otáčkách válce viskozimetru je zřejmé, že i olivový olej je newtonská kapalina (Obr. 11).



Obr. 11: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u olivového oleje

7.1.3 Polotučné mléko 1,5% tuku, výrobce Pragolaktos

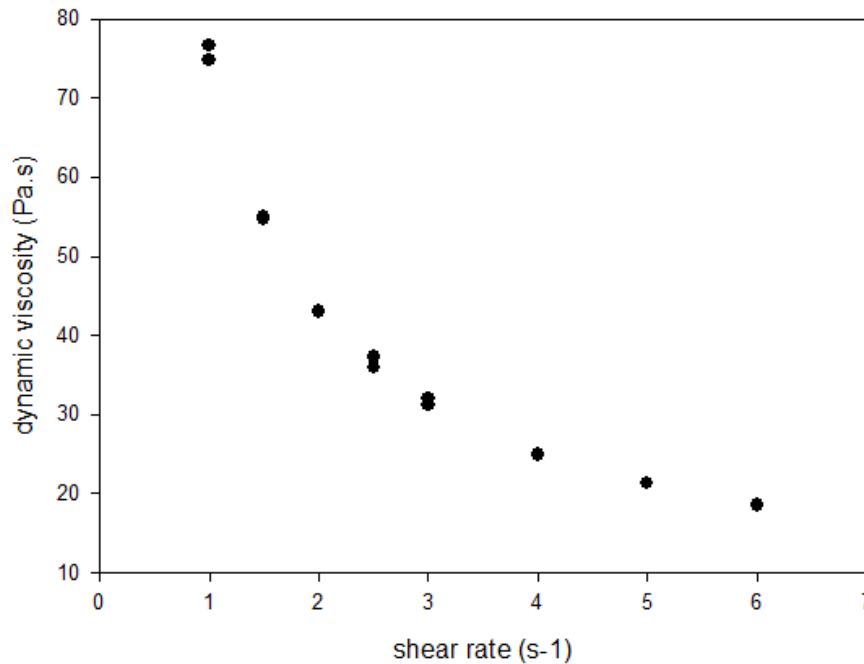
Byla měřena viskozita komerčně zakoupeného polotučného mléka. Měření probíhalo na Ubbelohdeho viskozimetru při teplotě 25°C. Dynamická viskozita byla $1,500 \pm 0,002$ mPa.s.

Mléko může mít za určitých podmínek (nízké smykové rychlosti, nízká teplota a vyšší obsah tuku) i neneutonské chování [31].

7.2 Neneutonské kapaliny

7.2.1 Kečup jemný, výrobce AVE

Viskozita kečupu byla měřena při teplotách 10°C a 23°C. Kečup vykazuje podle naměřených tokových křivek pseudoplastické chování. Při teplotě 10°C a smykové rychlosti $1 s^{-1}$ byla dynamická viskozita kečupu 88,2 Pa.s. U měření při 23°C a smykové rychlosti $1 s^{-1}$ byla dynamická viskozita byla 76,7 Pa.s. Z naměřených dat tedy správně vyplývá, že se zvyšující teplotou se viskozita snižuje.

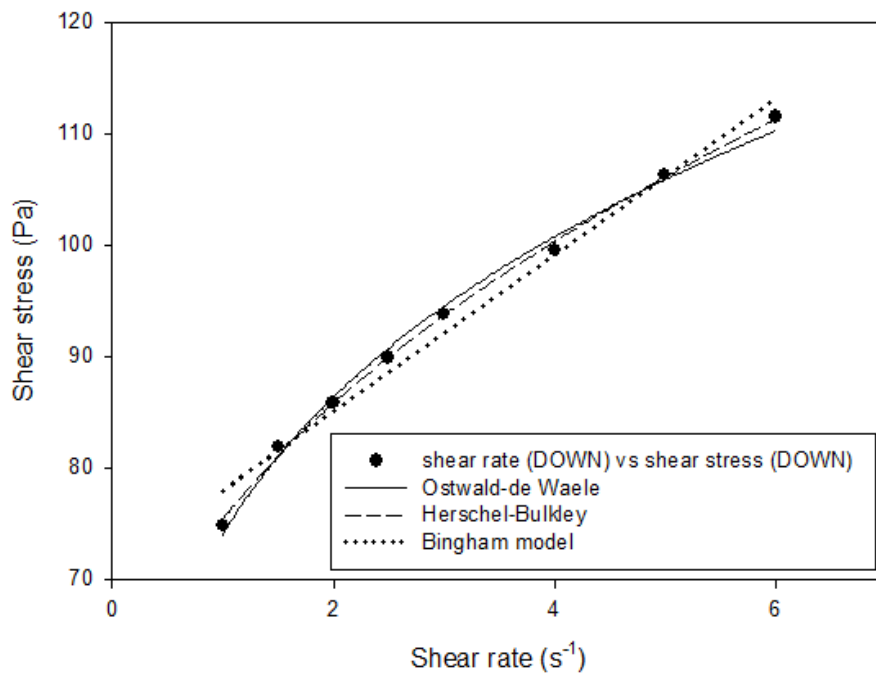


Obr. 12: Závislost mezi dynamickou viskozitou (dynamic viscosity) a smykovou rychlostí (shear rate) u kečupu při 23°C

Z grafu závislosti mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u snižujících se otáček válce viskozimetru vyplývá, že pro kečup je nejvhodnější reologický model Herschel – Bulkley (Obr. 13), který měl při obou teplotách měření stejný koeficient deteminace $R^2 = 0,998$. Mez toku τ_0 je velmi důležitý údaj pro výrobu kečupu, se zvyšující teplotou se mez toku snižuje. Dle výrobce bylo na 100 g kečupu použito 140 g rajčat.

Parametry modelu Herschel – Bulkley, teplota 10°C: $\tau_0 = 65,9 \pm 4,5$ Pa; $K = 21,2 \pm 6,5$ Pa.sⁿ; $n = 0,684 \pm 0,276$

Parametry modelu Herschel – Bulkley, teplota 23°C: $\tau_0 = 48,3 \pm 6,3$ Pa; $K = 27,0 \pm 6,0$ Pa.sⁿ; $n = 0,472 \pm 0,007$



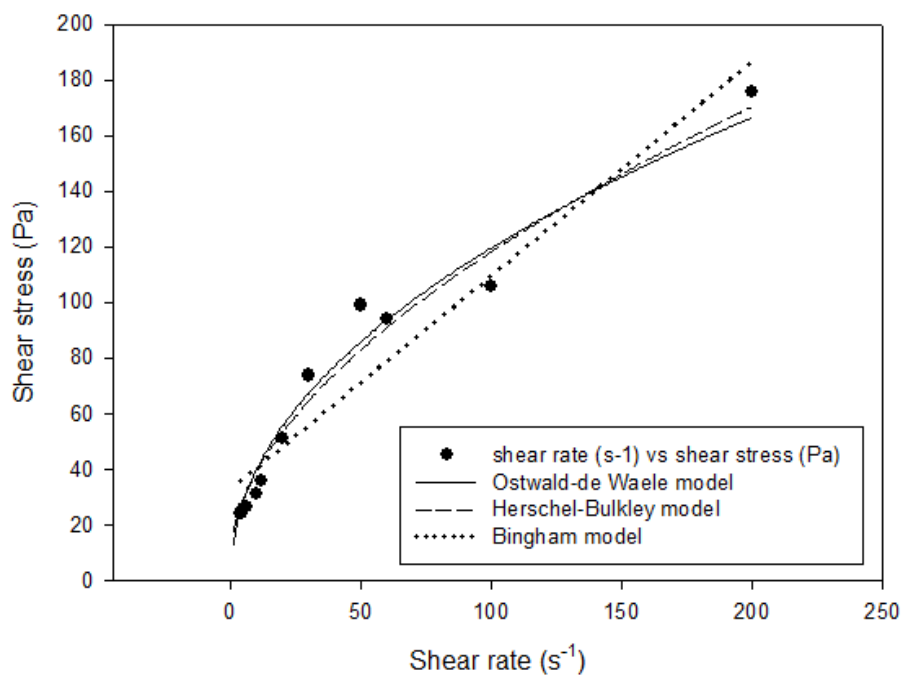
Obr. 13: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u kečupu měřeného při 23°C, vyznačení průběhu modelů Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley a Bingham

7.2.2 Zakysaná smetana 15% tuku, výrobce Mlékárna Kunín

Byla měřena viskozita zakysané smetany při teplotě 24°C, která má, stejně jako kečup, pseudoplastické vlastnosti.

Z grafu závislosti mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí při zvyšujících se otáčkách válce viskozimetru vyplývá, že modely Ostwald de Waele a Herschel – Bulkley mají velmi podobný průběh průběh (Obr. 14). Vhodnější zde bylo použít model Ostwald de Waele, který měl vyšší koeficient determinace $R^2 = 0,957$.

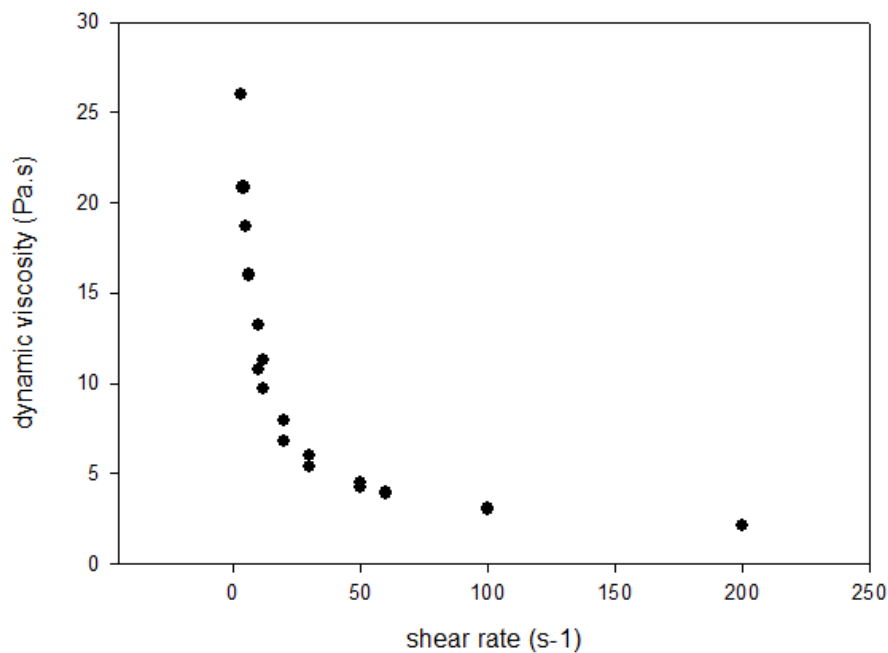
Parametry modelu Ostwald de Waele: $K = 11,4 \pm 1,7 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$; $n = 0,514 \pm 0,032$



Obr. 14: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u zakysané smetany, vyznačení průběhu modelů Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley a Bingham

7.2.3 Jablečné pyrė s banány, výrobce HAMÉ

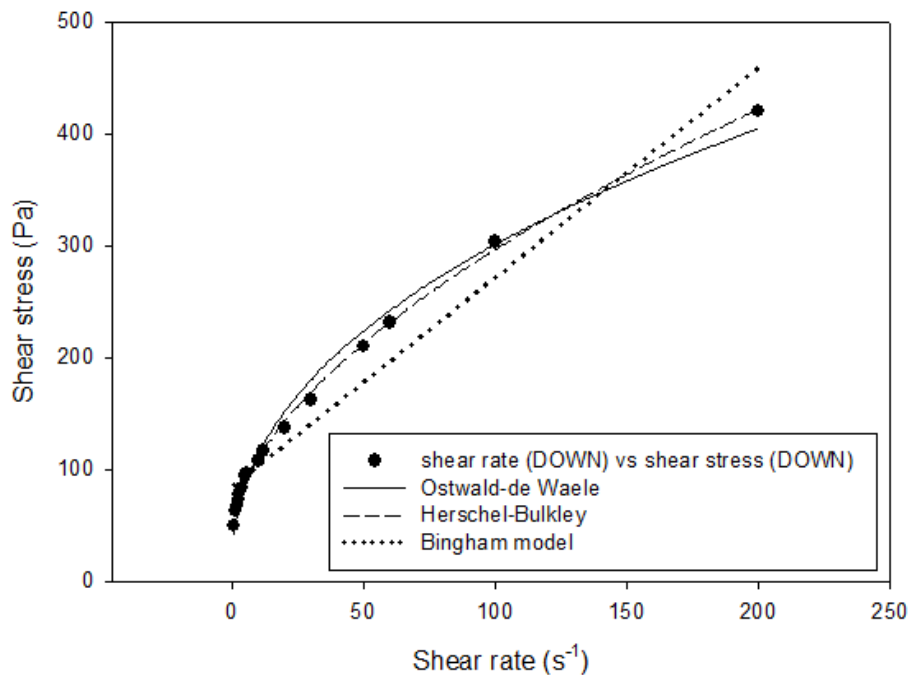
Měření viskozity jablečného pyrė s banány bylo prováděno při teplotě 24°C. Jablečné pyrė má podle výsledků měření v obrázku 15 také pseudoplastické vlastnosti.



Obr. 15: Závislost mezi dynamickou viskozitou (dynamic viscosity) a smykovou rychlostí (shear rate) u jablečného pyré

Z grafu závislosti mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí u klesajících otáček cívky viskozimetru je patrné, že pro tento výrobek bylo nejvhodnější použít model Herschel – Bulkley (Obr. 16), jehož koeficient determinace je $R^2 = 0,962$.

Parametry modelu Herschel – Bulkley: $\tau_0 = 40,8 \pm 4,0$ Pa; $K = 18,0 \pm 2,0$ Pa.sⁿ; $n = 0,576 \pm 0,021$



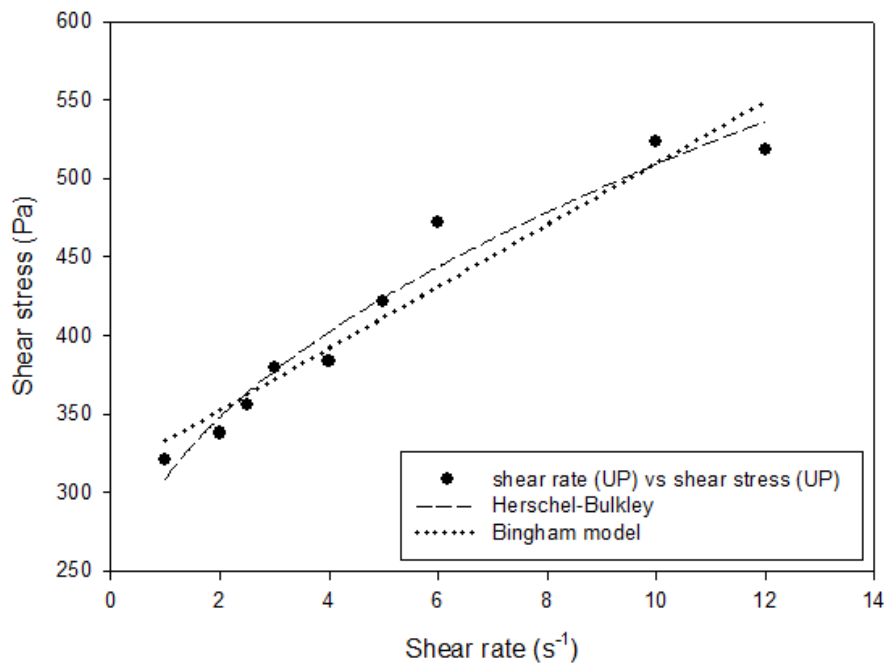
Obr. 16: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u jablečného pyré, vyznačení průběhu modelů Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley a Bingham

7.2.4 Hamánek, babiččino kuře se zeleninou a rýží, výrobce HAMÉ

U výrobku Hamánek byla měřena viskozita při teplotě 20°C a výrobek se choval pseudoplasticky.

Podle grafu závislosti smykového napětí (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) při zvyšujících se otáčkách válce viskozimetru byl pro tento produkt jediný použitelný model Herschel – Bulkley (Obr. 17) s koeficientem determinace $R^2 = 0,997$. V počítačovém programu *SigmaPlot* měl model Ostwald de Waele absolutně nesmyslný průběh, proto není v grafu vůbec uveden.

Parametry modelu Herschel – Bulkley: $\tau_0 = 212,0 \pm 9,8$ Pa; $K = 96,9 \pm 8,5$ Pa.sⁿ; $n = 0,486 \pm 0,243$



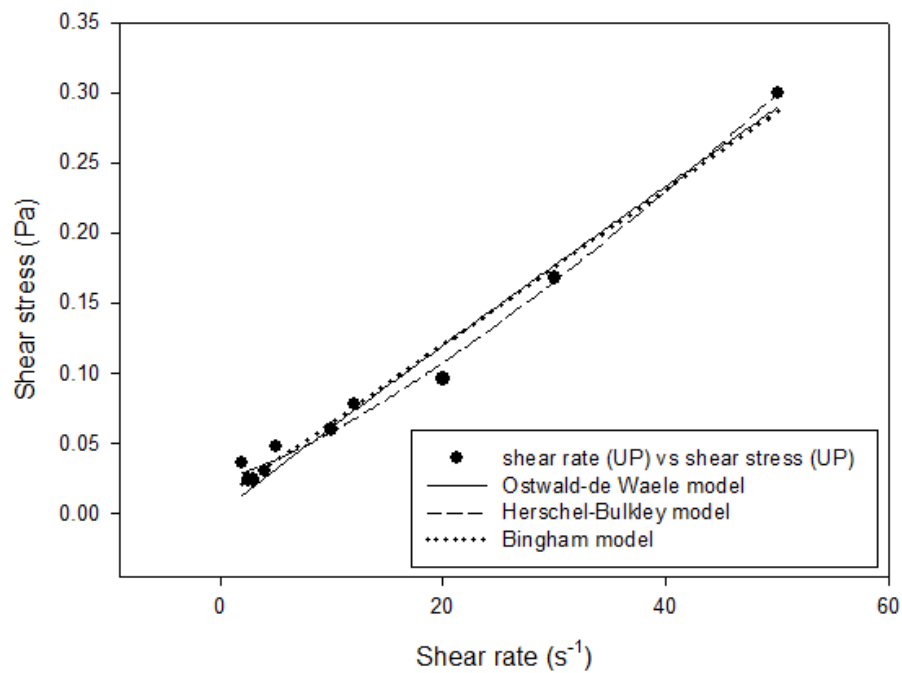
Obr. 17: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u výrobku Hamánek babiččino kuře, vyznačení průběhu modelu Herschel – Bulkley a Bingham

7.2.5 Mléčný čokoládový nápoj, výrobce Candia

Byla měřena viskozita mléčného čokoládového nápoje z částečně odstředěného mléka s 1% tuku při teplotě 24°C. Čokoládový nápoj představuje neneutonské chování kapalin při daných měřených smykových rychlostech a dané teplotě, díky nízkému obsahu tuku, obsahu kakaového prášku a cukru (Obr. 18).

Podle grafu závislosti mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u mléčného čokoládového nápoje se zvyšujícími se otáčkami válce viskozimetru bylo zde nejvhodnější použít reologický model Ostwald de Waele (Obr. 13) s koeficientem determinace $R^2 = 0,978$.

Parametry modelu Ostwald de Waele: $K = 6,7 \pm 1,8 \text{ mPa}\cdot\text{s}^n$; $n = 0,962 \pm 0,072$



Obr. 18: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u mléčného čokoládového nápoje, vyznačení průběhu modelů Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley

Tab. 2: Výsledky měření u newtonských kapalin

Potravina a teplota	Viskozita [mPa.s]
Slunečnicový olej, 24°C	59,1 ± 2,2
Olivový olej, 24°C	74,6 ± 2,1
Polotučné mléko 1,5% tuku, 25°C	1,500 ± 0,002

Tab. 3: Výsledky měření u nenewtoských kapalin

Potravina a teplota	Reologický model	Mez toku τ_0 [Pa]	Součinitel konzistence K [Pa.s ⁿ]	Index tokového chování n	Koeficient determinace R^2
Kečup jemný, 10°C	Herschel – Bulkley	68,9 ± 14,5	21,2 ± 6,5	0,684 ± 0,276	0,998
Kečup jemný, 23°C	Herschel – Bulkley	48,3 ± 6,3	27,0 ± 6,0	0,472 ± 0,007	0,998
Zakysaná smetana 15% tuku, 24°C	Ostwald de Waele	-	11,4 ± 1,7	0,514 ± 0,032	0,957
Jablečné pyré s banány, 24°C	Herschel – Bulkley	40,8 ± 4,0	18,0 ± 2,0	0,576 ± 0,021	0,962
Hamánek s kuřetem a rýží, 20°C	Herschel – Bulkley	212,0 ± 9,8	96,9 ± 8,5	0,476 ± 0,243	0,997
Mléčný čokoládový nápoj, 24°C	Ostwald de Waele	-	6,7.10 ⁻³ ± 1,8.10 ⁻³	0,962 ± 0,072	0,978

ZÁVĚR

Viskozita slunečnicového a olivového oleje vykazovala při teplotě 24°C newtonské chování. Hodnota viskozity u slunečnicového oleje byla $59,1 \pm 2,2$ mPa.s a u olivového oleje byla $74,6 \pm 2,1$ mPa.s. Lemuel M. Diamante z univerzity v novozélandkém Otagu měřil viskozitu těchto olejů při teplotě 26°C. Slunečnicový olej měl viskozitu $48,8 \pm 0,2$ mPa.s a olivový olej měl viskozitu $56,2 \pm 0,3$ mPa.s [30]. Nižší viskozita, než při našem měření byla zřejmě způsobena jinou strukturou vzorku a rozdílnou teplotou.

Polotučné mléko s 1,5% tuku bylo měřeno při teplotě 25°C a jeho viskozita byla $1,500 \pm 0,002$ mPa.s. Mléko bylo měřeno na Ubbelohdeho viskozimetru. D. Kristensen s kolektivem z univerzity v Kodani měřili reologické vlastnosti mléka s 3,5% tuku, viskozita mléka při 25°C byla $1,8 \pm 0,3$ mPa.s [31]. Mírně rozdílné hodnoty viskozity mohou být způsobeny rozdílným množstvím tuku ve vzorcích.

Reologické vlastnosti jemného kečupu byly měřeny při teplotách 10°C a 23°C. Při 10°C byly parametry nejvhodnějšího modelu Herschel-Bulkley následující: $\tau_0 = 65,9 \pm 14,5$ Pa; $K = 21,2 \pm 6,5$ Pa.sⁿ; $n = 0,684 \pm 0,027$ a u teploty 23°C: $\tau_0 = 48,3 \pm 6,3$ Pa; $K = 27,0 \pm 6,0$ Pa.sⁿ; $n = 0,472 \pm 0,007$. A. M. Sharoba s kolektivem z Technické univerzity v Berlíně zkoumali reologické vlastnosti v Německu zakoupeného jemného kečupu Werder. Parametry modelu Herschel-Bulkley při teplotě 10°C byly: $\tau_0 = 15,1$ Pa; $K = 15,7$ Pa.sⁿ; $n = 0,365$ a při teplotě 20°C byly: $\tau_0 = 13,2$ Pa; $K = 14,3$ Pa.sⁿ; $n = 0,353$ [32]. Rozdílné hodnoty byly pravděpodobně způsobeny jinou složením kečupů, závisí na výrobci.

Zakysaná smetana s 15% tuku byla měřena při teplotě 24°C. Nejvhodnější reologický model Ostwald de Waele měl následující parametry: $K = 11,4 \pm 1,7$ Pa.sⁿ; $n = 0,514 \pm 0,108$.

Reologické vlastnosti jablečného pyrě s banány byly měřeny při teplotě 24°C. Parametry nejvhodnějšího modelu Herschel-Bulkley byly: $\tau_0 = 40,8 \pm 4,0$ Pa; $K = 18,0 \pm 2,0$ Pa.sⁿ; $n = 0,576 \pm 0,021$. Lemuel M. Diamante a Moyuru Umemoto měřili reologické vlastnosti jablečného pyrě při 20°C, parametry modelu Herschel-Bulkley byly $\tau_0 = 3,4$ Pa; $K = 4,8$ Pa.sⁿ; $n = 0,384$ [33]. Rozdílné výsledky mohou být způsobeny rozdílnou teplotou při měření a jiným složením vzorku.

Hamánek s kuřetem a rýží byl měřen při teplotě 20°C, parametry nejvhodnějšího modelu Herschel-Bulkley byly následující: $\tau_0 = 212,0 \pm 9,8$ Pa; $K = 96,9 \pm 8,5$ Pa.sⁿ; $n =$

$0,486 \pm 0,243$. Jasim Ahmed a Hosahalli S. Ramaswamy z kanadské univerzity ve městě Sainte Anne de Bellevue měřili reologické vlastnosti dětské přesnídávky s rozmixovaným kuřetem, parametry modelu Herschel-Bulkley při teplotě 20°C byly: $\tau_0 = 5,0 \text{ Pa}$; $K = 4,7 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$; $n = 0,610$ [34]. Rozdílné hodnoty mohli být způsobeny tím, že v našem vzorku byly celé kousky kuřete a rýže.

Reologické vlastnosti mléčného čokoládového nápoje byly měřeny při teplotě 24°C . Jako nejvhodnější byl vyhodnocen na základě nejvyššího koeficientu determinace model Ostwald de Waele, který měl parametry: $K = 6,7 \pm 1,8 \text{ mPa}\cdot\text{s}^n$; $n = 0,962 \pm 0,032$. Mario Yanes s kolektivem z Agrochemického institutu ve Valencii také měřili reologické vlastnosti čokoládového nápoje z částečně odstředěného mléka při 25°C . Viskozita. Parametry modelu Ostwald de Waele byly následující: $K = 6,8 \text{ mPa}\cdot\text{s}^n$; $n = 0,925$ [35].

Reologické vlastnosti potravin jsou velmi důležité pro výrobu, skladování a stabilitu potravinářských produktů. Spolehlivá a přesná reologická data jsou potřebná pro plánování a optimalizaci různých výrobních zařízení jako jsou např. čerpadla, tepelné výměníky a potrubí.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Reologie* [online]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2017-09-15]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_03.pdf
- [2] JANALÍK, J. *Viskozita tekutin a její měření* [online]. 2010 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Janalik-TEXTviskozitaPDF.pdf>.
- [3] WEIN, O. *Úvod do reologie*. Brno, Malé centrum, 1996, 84 s. ISBN 80-238-0928-8.
- [4] MACOSKO, Ch. W. *Rheology: principles, measurements, and applications*. New York: Wiley, 1994, 550 s. Advances in interfacial engineering series. ISBN 0-471-18575-2
- [5] HAVRÁNEK, A. *Reologie a její aplikace na biolátky* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:uj9j6zRHK9QJ:web.ftvs.cuni.cz/elstudovna/download.php%3Fdir%3D./obsah/abi/doc%26soubor%3DReologie.doc+%&cd=1&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>
- [6] RAO, M. A. *Rheology of Fluid and Semisolid Foods*, Boston, Springer, 2007, pages 471. ISBN 9780387709307
- [7] BUREŠOVÁ, I. LORENCOVÁ, E. *Výroba potravin rostlinného původu - Zpracování obilovin*. Zlín, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013. ISBN 9789807454-278-7
- [8] *Seminář reologie* [online]. Pragolab, 2015 [cit. 2017-09-15]. Dostupné z: http://www.pragolab.cz/files/download/Seminar_reologie_2015.pdf
- [9] HOLUBOVÁ, R. *Základy reologie a reometrie kapalin*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. ISBN 978-80-244-4178-8.
- [10] ŠTERN, P., *Využití reologie při výrobě potravin*, Průmysl potravin, 1991. s. 398 – 400
- [11] FEKETE, R. GUŽELA, Š. PECIAR, M. *Procesné strojíctvo*. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2007. ISBN 9788022727662
- [12] *Reologické vlastnosti*. BARTOVSKÁ, L. ŠIŠKOVÁ, M. Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav [online]. 5. vydání. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2005, s. 143 [cit. 2017-09-22]. ISBN 80-7080-579-X. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-579-X/pdf/143.pdf
- [13] ANANDHA RAO, M. *Rheology of fluid and semisolid foods – Principled and applications*, Geneva, New York, Springer, 1999, ISBN: 9780387709307

- [14] CHHABRA, R. P. *Bubbles, drops and particles in non-newtonian fluids*, London, New York, Taylor Francis Group, 2007, ISBN: 9780824723293
- [15] *Schlumberger* [online]. 2011 [cit. 2017-09-12]. Rheological models. Dostupné z <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/r/rheological.aspx>
- [16] STEFFE, J. F. *Rheological methods in food process engineering. 2nd ed. East Lansing*, MI: Freeman Press, 1996. ISBN 0963203614.
- [17] BOURNE, M. C. *Food texture and viscosity: concept and measurement. 2nd ed. San Diego*: Academic Press, 2002. ISBN 0121190625
- [18] PERLÍN C., 2004: Potravinová a nápojová reologie: vliv reologických a procesních parametrů [online]. Brno: Ústav zemědělské ekonomiky a informací. [cit. 2017-10-01]. Dostupné z: <http://www.agronavigator.cz/>
- [19] GIPSY, T. M. GUSTAVO, V. BARBOSA, C. Rheology for the food industry. *In Journal of Food Engineering*, volume 67, 2005, pages 147-156, ISSN 0260-8774
- [20] SUWONSICHON, T., PELEG, M. Rheological characterisation of almost intact and stirred yogurt by imperfect squeezing flow viscometry. *Journal of the Science of Food and Agri – culture*, volume 79, 2013.
- [21] *Reologie potravin a kosmetických prostředků – Reologie potravin* [online]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2017-09-15]. Dostupné z: <http://kosmetika.ft.utb.cz/EntityDisplayTab.aspx?id=4>
- [22] SHERMAN, P., *Industrial rheology*. London, New York: Academic Press, 1990.
- [23] LONG, Ch. YAOQI, T. YUXIANG, B. JINPENG, W. AIQUAN, J. ZHENGYU, J. *Effect of frying on the pasting and rheological properties of normal maize starch*. In *Food Hydrocolloids*, 2017, ISSN 0268-005X
- [24] HOJEROVÁ, J., ŠTERN, P., *Application of the simple rheological investigations to compare the flow behaviour of the cosmetic thickeners*. SÖFW–Journal, 126, 2012, č. 4.
- [25] *Reologie potravin a kosmetických prostředků* [online]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2017-09-15]. Dostupné z: <http://kosmetika.ft.utb.cz/EntityDisplayTab.aspx?id=4>
- [26] *Seminář reologie* [online]. Pragolab, 2015 [cit. 2017-09-15]. Dostupné z: http://www.pragolab.cz/files/download/Seminar_reologie_2015.pdf
- [27] *Měření tokových vlastností* [online]. Ústav fyziky a materiálového inženýrství Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2017-09-15]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_05.pdf

- [28] *Thermo Scientific Viscometer* [online]. 2010 [cit. 2017-10-10]. Thermo Scientific. Dostupné z: <https://www.pragolab.cz/documents/Thermo20Scientific%20Viscometers.pdf>
- [29] SEHN, G. R. STEEL, C. J. Classification of whole beat flour using a dimensionless number. *Journal of food science and technology*, volume 54, 2017, pages 3827 – 3836
- [30] DIAMANTE, L. M. LAN, T. Absolute Viscosities of Vegetable Oils at Different Temperatures. *Journal of Food Processing*, volume 2014, 2014, pages 1 - 6
- [31] KRISTENSEN, D. JENSEN, P. Y. MADSEN, F. BIRDI, K.S. Rheology and Surface Tension of Selected Processed Dairy Fluids: Influence of Temperature. *Journal of Dairy Science*, volume 80, 1997, pages 2282 - 2290
- [32] SHAROBA, A. M. EL-MANSY, H. A. BAHLOL, H. M. BLOCHWITZ, R. Chemical, sensory and rheological properties of some commercial German and Egyptian tomato ketchups. *European Food Research and Technology*, volume 220, 2005, pages 142 - 151
- [33] BALESTRA, F. COCCI, E. MARSILIO, G. ROSA M. D. Physico-chemical and rheological changes of fruit purees during storage. *Processia Food Science*, volume 1, 2011, pages 576 - 582
- [34] AHMED, J. RAMASWAMY, H. S. Dynamic rheology and thermal transitions in meat-based strained baby food. *Journal of Food Engineering*, volume 78, 2007, pages 1274 - 1284
- [35] YANES, M. DURÁN, L. COSTELL, E. Rheological and optical properties of commercial chocolate milk drinks. *Journal of Food Engineering*, volume 4, 2010, pages 229 - 234

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

v	kinematická viskozita
η	dynamická viskozita
ρ	hustota látky
τ	smykové napětí
γ	rychlostní gradient neboli rychlost smykové deformace
η_a	zdánlivá viskozita
τ_0	mez toku
K	součinitel konzistence
n	index tokového chování
°C	stupeň Celsia

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Závislost dynamické viskozity na rychlosti smykové deformace.....</i>	15
<i>Obr. 2: Chování tixotropních a reopektických látek v porovnání s newtonskou kapalinou, na obrázku je popsána závislost mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí</i>	16
<i>Obr. 3: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u jednotlivých reologických modelů.....</i>	18
<i>Obr. 4: Höpplerův viskozimetr</i>	23
<i>Obr. 5: Ostwaldův a Ubbelohdeho kapilární viskozimetry se znázorněnými ryskami</i>	24
<i>Obr. 6: Druhy geometrií rotačního reometru: válec – válec, kužel – deska a deska - deska</i>	25
<i>Obr. 7: Extensiograf při vyhodnocování protahovatelnosti těsta.....</i>	26
<i>Obr. 8: Rotační viskozimetr Thermo Haake VT 6L</i>	28
<i>Obr. 9: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u slunečnicového oleje</i>	30
<i>Obr. 10: Závislost mezi dynamickou viskozitou (dynamic viscosity) a smykovou rychlostí (shear rate) u slunečnicového oleje.....</i>	31
<i>Obr. 11: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u olivového oleje</i>	32
<i>Obr. 12: Závislost mezi dynamickou viskozitou (dynamic viscosity) a smykovou rychlostí (shear rate) u kečupu při 23°C</i>	33
<i>Obr. 13: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u kečupu měřeného při 23°C, vyznačení průběhu modelů Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley a Bingham.....</i>	34
<i>Obr. 14: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u zakysané smetany, vyznačení průběhu modelů Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley a Bingham.....</i>	35
<i>Obr. 15: Závislost mezi dynamickou viskozitou (dynamic viscosity) a smykovou rychlostí (shear rate) u jablečného pyrė.....</i>	36
<i>Obr. 16: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u jablečného pyrė, vyznačení průběhu modelů Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley a Bingham.....</i>	37

<i>Obr. 17: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u výrobku Hamánek babiččino kuře, vyznačení průběhu modelu Herschel – Bulkley a Bingham.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 18: Závislost mezi smykovým napětím (shear stress) a smykovou rychlostí (shear rate) u mléčného čokoládového nápoje, vyznačení průběhu modelů Ostwald de Waele, Herschel – Bulkley</i>	<i>39</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Přehled reologických modelů</i>	17
<i>Tab. 2: Výsledky měření u newtonských kapalin</i>	39
<i>Tab. 3: Výsledky měření u neneutonských kapalin</i>	40