



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

ANALÝZA VLASTNOSTÍ PROVOZNÍCH KAPALIN

ANALYSIS OF OPERATING FLUIDS PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN CHROBÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Jan Chrobák

ID: 88746

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Analýza vlastností provozních kapalin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s fyzikálními vlastnostmi kapalin a jejich matematickým popisem; zaměřte se zejména na hustotu, dynamickou viskozitu a index lomu. Popište metody měření těchto veličin. Na základě dostupné literatury zpracujte přehled průmyslových odvětví, ve kterých slouží sledování reologických a optických vlastností k hodnocení aktuálního stavu a kvality kapalných materiálů.

V rámci experimentální činnosti připravte několik sad kapalných vzorků v podobě chemických roztoků o různé koncentraci složek, přičemž se zaměřte i na kapaliny používané v potravinářském průmyslu. Připravené vzorky podrobte měření dynamické viskozity v závislosti na teplotě. Na základě získaných výsledků sestavte referenční křivky dynamické viskozity a diskutujte možnost využití metody měření jako diagnostického nástroje pro stanovení koncentrace látky ve vybraných kapalinách.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace díla:

CHROBÁK, J. Analýza vlastností provozních kapalin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Analýza vlastností provozních kapalin jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 24. května 2012

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinovi Frkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování diplomové práce.

V Brně dne 24. května 2012

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Předložená práce se zabývá měřením dynamické viskozity, hustoty a indexu lomu kapalin používaných v potravinářském průmyslu. Dále jsou v teorii popsány matematické a fyzikální principy měření těchto veličin. Proběhla analýza současného stavu v oblasti výzkumu a trendů v používání těchto měření v potravinářském průmyslu. V experimentální části byly připraveny vzorky s různou koncentrací ethanolu v destilované vodě a proběhlo měření vybraných materiálových veličin v širokém teplotním rozsahu. Následně byly sestaveny referenční křivky dynamické viskozity. V závěru je diskutováno možné použití metody jako diagnostického nástroje stanovení koncentrace látky ve vybraných kapalinách.

KLÍČOVÁ SLOVA

Viskozita, vazkost, měření viskozity, viskozimetr, dynamická viskozita, inherentní viskozita, redukováná viskozita, relativní viskozita, index lomu, mezní úhel, hustota, newtonská a neneutronská tekutina.

ABSTRACT

This diploma thesis is focused on introducing the mathematical and physical fundamentals of viscosity, density and refractive index of liquids and methods of its measurement. Based on available literatures specify review of areas in which the measurement of dynamic viscosity is used for evaluation the actual state of liquid materials. Discuss the possibility of using for example variables to determine the concentration of fat in milk and ethanol in alcoholic beverages. The sample of liquid to realize the practical measurements.

KEYWORDS

Viscosity, viscosity measurements, viscosimeter, dynamic viscosity, inherent viscosity, reduced viscosity, relative viscosity, specific viscosity, apparent viscosity, refractive index, critical angle, density, newtonian and non-newtonian liquid.

OBSAH

Obsah	v
Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	vii
Seznam grafů	vii
Seznam symbolů	viii
1 Úvod do měření viskozity	9
1.1 Viskozita	9
1.2 Viskozita disperzních systémů	10
1.3 Dynamická viskozita	11
1.4 Kinematická viskozita	11
1.5 Relativní viskozita	12
1.6 Inherentní viskozita	12
1.7 Inkrement relativní viskozity	12
1.8 Limitní viskozitní číslo	12
1.9 Redukovaná viskozita	13
1.10 Zdánlivá viskozita	13
1.11 Newtonská tekutina	13
1.12 Nenewtonská tekutina	14
1.13 Výpočet viskozity	14
1.14 Viskozita různých materiálů	15
2 Úvod do měření indexu lomu	16
2.1 Index lomu	16
3 Metody měření viskozity	19
3.1 Kapilární metoda	19
3.2 Metoda padající kuličky	20
3.3 Rotační viskozimetry	22
3.4 Vibrační metoda	23
4 Metody měření optického lomu	25
4.1 Abbého refraktometr	25
4.2 Pulfrichův refraktometr	25
4.3 Refraktometr s V-blokem	29
4.4 Ponorný refraktometr	31
5 Metody měření hustoty	33
5.1 Hustoměry	33
5.2 Hustota pomocí Archimédova zákona	33
6 Výzkum ve světě	35
6.1 Viskozita transformátorových olejů při nízké teplotě	35
6.2 Čidlo viskozity automobilového motorového oleje	35
6.3 Vliv viskozity tekutin na tryskovém proudění	35
6.4 Dynamická objemová viskozita polyisobutylenu	36
6.5 Viskozita v potravinářském průmyslu	36
6.6 Releogická měření v potravinářském průmyslu	37

7	Laboratorní měření	38
7.1	Vzorky mléčných výrobků	38
7.2	Vzorky roztoků destilované vody a ethanolu	38
7.3	Vzorky alkoholických nápojů	39
7.4	Hustota	40
7.5	Index lomu	42
7.6	Viskozita	43
5	Závěr	50
6	Seznam literatury	51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1:	Rychlostní profil v proudící kapalině	9
Obrázek 2:	Lom světla na rozhraní dvou prostředí	17
Obrázek 3:	Ubbelohdeův kapilární viskozimetr	19
Obrázek 4:	Höpplerův viskozimetr	21
Obrázek 5:	Schéma rotačního viskozimetru se dvěma soustřednými válci	22
Obrázek 6:	Schéma rotačního viskozimetru	23
Obrázek 7:	Schéma vibračního viskozimetru	23
Obrázek 8:	Abbého refraktometr	25
Obrázek 9:	Princip abbého refraktometru	26
Obrázek 10:	Stupnice dvou refraktometrů	27
Obrázek 11:	Kompenzátor s proměnnou disperzí	28
Obrázek 12:	Princip Pulfrichova refraktometru	29
Obrázek 13:	Princip měření indexu lomu pomocí V-bloku	29
Obrázek 14:	Princip refraktometru s V-blokem	31
Obrázek 15:	Princip ponorného refraktometru	31
Obrázek 16:	Hustoměr s vnitřním plovákem a laboratorní hustoměr	33
Obrázek 17:	Vztlková síla	34
Obrázek 18:	Čokoláda Milka Happy cow	36
Obrázek 19:	Váha Radwag XA 310/X	40
Obrázek 20 :	Možnost zavěšení plunžru na váze Radwag XA 310/X	40
Obrázek 21 :	Viskozimetr A&D SV-10	43

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Veličiny k vyjádření viskozity disperzních systémů	10
Tabulka 2: Viskozita různých materiálů	15
Tabulka 3: Index lomu různých materiálů	17
Tabulka 4: Parametry kuliček viskozimetru Haake	21
Tabulka 5: Možné vlnové délky světla pro rtuťovou výbojku	27
Tabulka 6: Obsah Absolutního ethylalkoholu	38
Tabulka 7: Hmotnostní poměr ethanolu a destilované vody	39
Tabulka 8: Viskozita vody, mléka a smetany	44

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Hustota roztoků v rozsahu teplot -40 °C až 70 °C	41
Graf 2: Index lomu v rozsahu teplot 23 °C až 70 °C	42
Graf 3: Dynamická viskozita v rozsahu teplot -40 °C až 70 °C	44
Graf 4: Dynamická viskozita v rozsahu teplot 0 °C až 23 °C	45
Graf 5: Dynamická viskozita v rozsahu teplot -40 °C až 0 °C	45
Graf 6: Dynamická viskozita v rozsahu teplot 70 °C až 23 °C	46
Graf 7: Kinematická viskozita v rozsahu teplot -40 °C až 70 °C	46
Graf 8: Kinematická viskozita v rozsahu teplot 0 °C až 23 °C	47
Graf 9: Kinematická viskozita v rozsahu teplot -40 °C až 0 °C	47
Graf 10: Kinematická viskozita v rozsahu teplot 70 °C až 23 °C	48
Graf 11: Odhad koncentrace alkoholu v alkoholickém nápoji	48
Graf 12: Odhad koncentrace alkoholu v alkoholickém nápoji – detail	49

Seznam SYMBOLŮ

A	[K ⁻¹]	viskózní konstanta
c ₀ , c ₁ , c ₂	[ms ⁻¹]	rychlost
D	[-]	gradient rychlosti
d	[kg m ⁻³]	hustota vzduchu
F _{VZ}	[N]	vztlaková síla
F _x	[N]	hydrodynamická síla
G	[N]	tíhová síla
g	[ms ⁻¹]	místní tíhové zrychlení
k	[-]	konstanta kapilárního viskozimetru
k _B	[JK ⁻¹]	Boltzmanova konstanta
l	[m]	délka
m ₁ , m ₂	[g]	hmotnost
m _e	[g]	hmotnost ethanolu
m _v	[g]	hmotnost destilované vody
n, N ₁ , N ₂	[-]	index lomu
p	[Pa]	tlak
r	[m]	poloměr
R	[m]	poloměr nádoby
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
T	[°C, K]	teplota, termodynamická konstanta
t, t _{ref}	[s]	čas
u, u _{ref}	[ms ⁻¹]	rychlost pádu kuličky
V	[m ³]	objem
v	[ms ⁻¹]	rychlost
V _e	[ml]	objem ethanolu
V _{pl}	[m ³]	objem plunžru
V _v	[ml]	objem destilované vody
w ₂	[-]	hmotnostní koncentrace
α, α ₁ , α ₂ , α ₃	[°]	úhel dopadu
β, β ₁ , β ₂	[°]	úhel lomu
γ	[°]	mezní úhel
ε _A , E	[J]	aktivační energie
η	[Pa s]	dynamická viskozita
η ₀	[Pa s]	viskozita čistého disperzního prostředí
η _i	[-]	inkrement relativní viskozity
η _{inh}	[cm ³ g ⁻¹]	inherentní viskozita
η _{red}	[cm ³ g ⁻¹]	redukováná viskozita
η _{rel}	[-]	relativní viskozita
[η]	[cm ³ g ⁻¹]	limitní viskozitní číslo
λ, λ _D	[nm]	vlnová délka
ν	[m ² s ⁻¹]	kinematická viskozita
ρ, ρ _{ref}	[kg m ⁻³]	hustota kapaliny
ρ _T	[kg m ⁻³]	hustota kuličky
τ	[Pa]	tečné napětí
φ	[Pa-1 s-1]	tekutost
ω	[°]	lámavý úhel

1 Úvod do měření viskozity

1.1 Viskozita

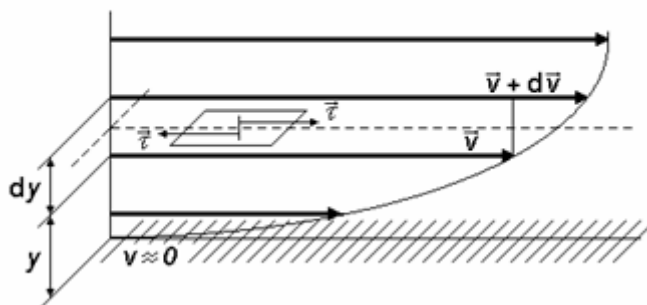
Viskozita (také vazkost) je fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny.

Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině.

Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní (vazké).

Viskozita klesá s rostoucí teplotou a roste s rostoucím tlakem. Vliv tlaku je však obvykle zanedbatelný.

Grafické znázornění rozdělení rychlostí v příčném řezu proudící tekutinou určuje rychlostní profil a je na následujícím obrázku.



Obrázek 1: Rychlostní profil v proudící kapalině [3]

Směrnice tečny v každém bodě tohoto profilu udává jak gradient rychlosti tak i tečné napětí τ . Tekutiny, pro které platí přímá úměrnost nazýváme newtonské, ostatní nazýváme nenewtonské. Tokové chování nenewtonských kapalin se může plně charakterizovat při určité teplotě pouze na základě tokové křivky (reogramu), která popisuje tokové chování v závislosti na smykovém napětí a smykové rychlosti pro širší oblast hodnot.

1.2 Viskozita disperzních systémů

Viskozita disperze je v důsledku přítomnosti disperzních částic vždy vyšší než viskozita disperzního prostředí. Jestliže rozměry disperzních částic značně převyšují rozměry molekul disperzního prostředí, mění se dráhy jednotlivých molekul proudící kapaliny a může vést až k promíchávání jednotlivých vrstev. Částice rovněž zmenšují prostor, který zaujímá v proudu kapalina sama, a tím zvětšují průměrný gradient rychlosti.

Závislost viskozity zředěných disperzních systémů na objemovém zlomku disperzního podílu popisuje Einsteinova rovnice pro viskozitu

$$\eta = \eta_0(1 + 2,5\varphi). \quad (1)$$

Odchyly od Einsteinovy rovnice mohou být způsobeny nabobtnáním částic disperzním prostředím, vznikem solvátového obalu nebo adsorpcí na povrchu částice. Objemový zlomek disperzního podílu, vypočtený podle Einsteinovy rovnice z experimentální hodnoty viskozity, je v těchto případech větší, než by odpovídalo suchému disperznímu podílu a nazývá se efektivní objemový zlomek; známe-li velikost vlastní částice, můžeme z efektivního objemového zlomku přibližně vypočítat tloušťku obalové vrstvy.

Anizometrické částice vykonávají při toku rotační pohyb, což rovněž působí zvýšení viskozity. Také elektricky nabitě disperzní částice, které jsou obklopené elektrickou dvojrivrstvou, zvyšují viskozitu systému.

Při vyšších koncentracích disperzního podílu se používá Einsteinova rovnice rozšířená o další členy

$$\eta = \eta_0(1 + 2,5\varphi + k^2\varphi^2 + k^3\varphi^3 + \dots). \quad (2)$$

U mnohých koncentrovaných disperzí, zvláště obsahují-li anizometrické částice, jsou pozorovány odchylky od newtonského chování. Jejich zdánlivá viskozita může s rostoucím rychlostním gradientem klesat i stoupat (viz pseudoplasticita, plasticita, dilatance).

Tabulka 1: Veličiny k vyjádření viskozity disperzních systémů

Název	Definiční vztah	Limitní hodnota pro $w_2 \rightarrow 0$
Viskozita	$\eta = -\tau_{xy} \cdot dy \cdot du_x^{-1}$	η_0
Relativní viskozita	$\eta_{rel} = \eta \cdot \eta_0^{-1}$	1
Inkrement relativní viskozity (dříve specifická viskozita)	$\eta_i = (\eta - \eta_0)\eta_0^{-1} = \eta_{rel} - 1$	0
Redukovaná viskozita (viskozitní číslo)	$\eta_{red} = \eta_i \cdot w_2^{-1}$	$[\eta]$
Inherentní viskozita	$\eta_{inh} = w_2^{-1} \ln \eta_{rel}$	$[\eta]$
Limitní viskozitní číslo (vnitřní viskozita)	$[\eta] = \lim_{w_2 \rightarrow 0} \eta_{red} = \lim_{w_2 \rightarrow 0} \eta_{inh}$	–

Viskozita studovaného disperzního systému je označena jako η , η_0 viskozita čistého disperzního prostředí, w_2 hmotnostní koncentrace (místo hmotnostní koncentrace se také používá objemový zlomek, ve starší literatuře gramy na 100 ml roztoku; rozměr η_{red} závisí na použitém koncentračním vyjádření).

1.3 Dynamická viskozita

Konstanta úměrnosti mezi tečným napětím τ_{xy} a gradientem rychlosti mezi dvěma sousedními vrstvami proudící tekutiny, du_x/dy (Newtonův zákon)

$$\tau_{xy} = -\eta \cdot dy \cdot du_x^{-1}, \quad (3)$$

kde u_x je rychlost toku ve směru osy x .

Starší hodnoty viskozity jsou uváděny v Poisech [P] (1P = 0,1 Pa s). Reciproká dynamická viskozita se nazývá fluidita. V technické praxi se často používá kinematická viskozita, což je podíl dynamické viskozity a hustoty.

1.4 Kinematická viskozita

Kinematická viskozita je poměr dynamické viskozity a hustoty

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (4)$$

Viskozita patří mezi transportní jevy. Jde v podstatě o přenos hybnosti mezi dvěma sousedními vrstvami kapaliny realizovaný prostřednictvím molekul. Tento proces je procesem tepelně aktivovaným. Změnu viskozity s teplotou můžeme charakterizovat vztahem

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_A}{k_B T}\right), \quad (5)$$

kde ε_A je aktivační energie, k_B je Boltzmanova konstanta, T termodynamická konstanta a η_0 viskozita čistého disperzního prostředí.

Pokud chceme vyjádřit aktivační energii, rovnici zlogaritmuje

$$\ln(\eta) = \ln(\eta_0) + \frac{\varepsilon_A}{k_B T}. \quad (6)$$

Je to rovnice přímky s proměnnými $\ln(\eta)$ a $1/T$.

1.5 Relativní viskozita

Poměr viskozity disperzního systému nebo roztoku (η) k viskozitě čistého disperzního prostředí nebo rozpouštědla (η_0)

$$\eta_{rel} = \eta \cdot \eta_0^{-1}. \quad (7)$$

Vyjadřuje odlišnost viskozity disperze od viskozity disperzního prostředí.

1.6 Inherentní viskozita

Veličina, která vyjadřuje odlišnost viskozity disperzního systému od viskozity disperzního prostředí jako přirozený logaritmus relativní viskozity dělený koncentrací disperzního podílu (hmotnost v jednotce objemu, objemový zlomek, ve starší literatuře gramy na 100 ml roztoku)

$$\eta_{inh} = w_2^{-1} \ln \eta_{rel}, \quad (8)$$

kde w_2 je hmotnostní koncentrace.

Inherentní viskozita má rozměr reciproké koncentrace.

1.7 Inkrement relativní viskozity

Veličina, která vyjadřuje vzrůst viskozity disperzního prostředí v důsledku přítomnosti disperzního podílu. Je rovna relativní viskozitě zmenšené o jedničku

$$\eta_i = (\eta - \eta_0) \eta_0^{-1} = \eta_{rel} - 1. \quad (9)$$

Dříve se nazývala specifická viskozita.

1.8 Limitní viskozitní číslo

Hodnota redukováne nebo inherentní viskozity při nulové koncentraci disperzního podílu, získaná extrapolací koncentrační závislosti těchto veličin

$$[\eta] = \lim_{w_2 \rightarrow 0} \eta_{red} = \lim_{w_2 \rightarrow 0} \eta_{inh}. \quad (10)$$

Má rozměr reciproké koncentrace. Dříve se veličina nazývala vnitřní viskozita.

1.9 Redukovaná viskozita

Veličina, která vyjadřuje odlišnost viskozity disperzního systému od viskozity disperzního prostředí jako inkrement relativní viskozity dělený koncentrací disperzního podílu (hmotnost v jednotce objemu, objemový zlomek, ve starší literatuře gramy na 100 ml roztoku)

$$\eta_{red} = \eta_1 \cdot w_2^{-1} = (\eta_{rel} - 1)w_2^{-1}. \quad (11)$$

Rozměr η_{red} je převrácená hodnota koncentrace. Synonymum je viskozitní číslo.

1.10 Zdánlivá viskozita

Poměr tečného napětí a rychlostního gradientu, který je u neneutonských kapalin funkcí rychlostního gradientu. Údaj o hodnotě zdánlivé viskozity má význam pouze tehdy, je-li současně uvedena metoda měření a hodnota příslušného rychlostního gradientu.

1.11 Newtonská tekutina

Newtonská látka je reologický model viskózní látky, který se řídí Newtonovým zákonem viskozity.

Reologická rovnice newtonské látky je tedy charakterizována přímou úměrností rychlosti deformace a napětí. Reologickou rovnicí je Newtonův zákon viskozity a materiálovou konstantou charakterizující danou newtonskou látku je viskozita.

Funkční závislost mezi τ a D se nazývá rovnicí toku

$$\tau = f(D). \quad (12)$$

Jestliže tekutina splňuje Newtonův viskózní zákon, tj. závislost mezi τ a D je lineární

$$\tau = \eta D. \quad (13)$$

Dynamická viskozita tekutiny η je pro newtonovskou tekutinu nezávislá na deformační rychlosti a můžeme ji určit z grafu závislosti $t(D)$. Newtonovskými kapalinami jsou zpravidla nízkomolekulární látky (např. voda, ethanol, glycerol).

1.12 Neneutonská tekutina

Neřídí se Newtonovým zákonem ani při laminárním toku, poměr tečného napětí a rychlostního gradientu není konstantní, závisí na hodnotě rychlostního gradientu. Bývá označován jako neneutonská nebo zdánlivá viskozita. Podle průběhu závislosti rychlostního gradientu na tečném napětí jsou rozlišovány různé typy neneutonských kapalin:

- pseudoplastické a plastické, jejichž viskozita s rostoucím rychlostním gradientem klesá
- dilatantní, jejichž viskozita s rychlostním gradientem vzrůstá

Viskozita neneutonských kapalin může být časově závislá.

Kapalina je neneutonská tehdy, vychází-li viskozita pro různé rychlosti deformace D různá, tj. převyšuje-li systematická odchylka viskozity chybu přístroje. Viskozita neneutonské kapaliny není materiálovou konstantou, ale závisí na rychlosti deformace nebo smykovém napětí. Pro závislost viskozity na rychlosti deformace pro některé neneutonské kapaliny platí mocninný zákon

$$\eta = mD^{n-1}, \quad (14)$$

kde m je konstanta. Pokud je $n < 1$ jsou to kapaliny pseudoplastické a plastické. pokud je $n > 1$ jsou to látky dilatantní.

1.13 Výpočet viskozity

Vnitřní tření závislé na gradientu rychlosti vztahem

$$\tau = \eta \cdot dy \cdot dy^{-1}, \quad (15)$$

kde $(dy \cdot dy^{-1})$ označuje gradient (růst) rychlosti ve směru kolmém na rychlost, τ je tečné napětí a η se nazývá součinitel viskozity (vnitřního tření) neboli dynamická viskozita (vazkost). Převrácená hodnota dynamické viskozity se nazývá tekutost

$$\varphi = \eta^{-1}. \quad (16)$$

Podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny se označuje jako součinitel kinematické viskozity nebo kinematická viskozita

$$\nu = \eta \rho^{-1}. \quad (17)$$

Uvedený vztah pro dynamickou viskozitu pochází od Newtona a platí pro velkou většinu kapalin i plynů. Takové tekutiny se nazývají newtonské tekutiny. Dynamická viskozita u nich nezávisí na gradientu rychlosti. Existují však také anomální tekutiny, u nichž je viskozita na gradientu rychlosti závislá. Takové kapaliny se nazývají neneutonské.

1.14 Viskozita různých materiálů

Hodnoty nejpoužívanějších materiálů najdete v následujících tabulkách

Tabulka 2: Viskozita různých materiálů

Jednoduché tekutiny	T (°C)	η (mPa s)
ethyl alkohol	20	1,1
isopropyl alcohol	20	2,4
methyl alkohol	20	0,59
krev	37	3–4
ethylen glykol	25	16,1
ethylen glykol	100	1,98
freon 11 (palivo)	-25	0,74
freon 11 (palivo)	0	0,54
freon 11 (palivo)	25	0,42
freon 12 (chladio)	15	0,2
glycerin	20	1420
glycerin	40	280
rtuť	15	1,55
mléko	25	3
rostlinný řepkový olej	25	57
rostlinný řepkový olej	40	33
rostlinný kukuřičný olej	20	65
rostlinný kukuřičný olej	40	31
rostlinný olivový olej	20	84
rostlinný sojový olej	20	69
rostlinný sojový olej	40	26
lehký motorový olej	20	102
těžký motorový olej	20	233
motorový olej SAE 10	20	65
motorový olej SAE 20	20	125
motorový olej SAE 30	20	200
motorový olej SAE 40	20	319
propylen glykol	25	40,4
propylen glykol	100	2,75
voda	0	1,79
voda	20	1
voda	40	0,65
voda	100	0,28

Plyny	T (°C)	η (μ Pa s)
vzduch	15	17,9
vodík	0	8,42
helium	0	18,6
dusík	0	16,7
kyslík	0	18,1

Materiály	T (°C)	η (Pa s)
pálené vápno	20	1000
sklo, pokojová teplota		$10^{18}-10^{21}$
sklo, bod křehnutí		$10^{13,6}$
sklo, bod žhání		$10^{12,4}$
sklo, bod měknutí		$10^{6,6}$
sklo, pracovní teplota		1000
sklo, bod tání		100
med	20	10
ketchup	20	50
sádlo	20	1000
melasa	20	5
hořčice	25	70
arašidové máslo	20	150–250
zakysaná smetana	25	100
čokoládový sirup	20	10–25
kukuřičný sirup	25	2–3
javorový sirup	20	2–3
dehet	20	30,000
rostlinný tuk	20	1200

Nejčastěji se určení viskozity používá v olejářském průmyslu. Oleje slouží pro mazání pohyblivých částí spalovacích motorů. Je nutné zajistit dobré vlastnosti oleje v širokém spektru teplot. Olej nesmí být ani příliš viskózní, ani příliš řídký, aby zajistil optimální funkci motoru. Viskozita je nejdůležitější parametr při výběru oleje do spalovacího motoru. V této oblasti jsou náklady na pořízení viskozimetru zanedbatelné.

2 Úvod do měření indexu lomu

2.1 Index lomu

Dopadá-li paprsek monochromatického záření, tj. paprsek určité frekvence a vlnové délky na rozhraní dvou prostředí lišících se hustotou, zčásti se od rozhraní odráží a zčásti jím prochází. Obě prostředí musí být průhledná nebo průsvitná. Přitom prostředí klade průchodu paprsku určitý odpor, jehož velikost závisí na hustotě prostředí. Podíl rychlostí světla v obou prostředích je pro dané rozhraní prostředí konstantní veličina. Nazýváme ji index lomu a označujeme n .

Poměr rychlosti průniku paprsku v prvním prostředí c_1 k rychlosti v druhém prostředí c_2 se nazývá index lomu n a charakterizuje ho tedy vztah

$$n = \frac{c_1}{c_2}. \quad (18)$$

Absolutní index lomu je popsán jako poměr rychlosti šíření světla ve vakuu a v daném prostředí. Je charakteristikou konkrétního prostředí, jedná se o materiálovou konstantu. Protože je v každém prostředí rychlost světla nižší než rychlost světla ve vakuu, je absolutní index lomu vždy vyšší než jedna a je definován vztahem

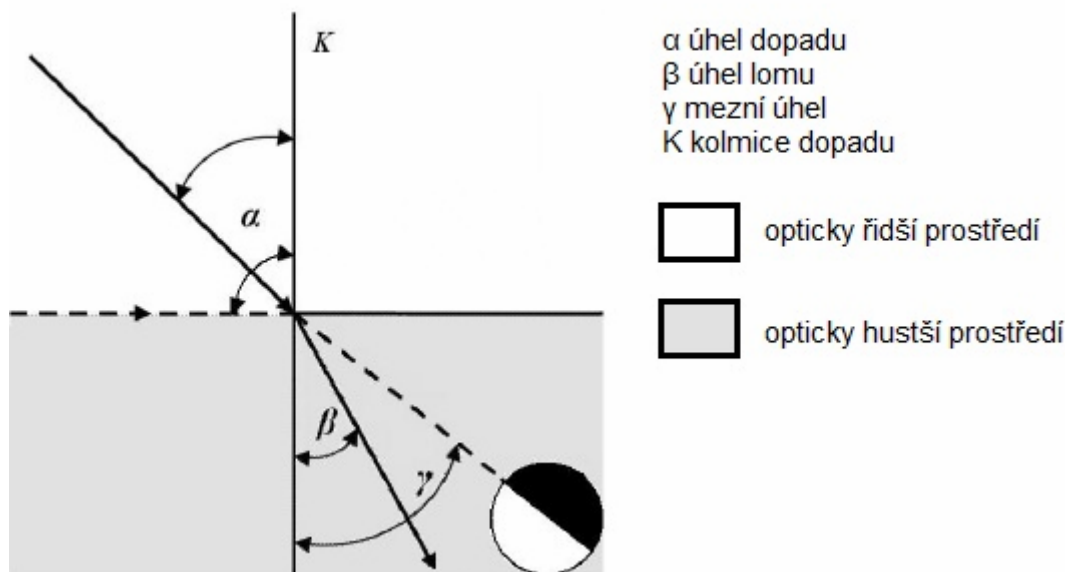
$$n = \frac{c_0}{c_2}. \quad (19)$$

Relativní index lomu je definován jako poměr rychlostí šíření světla ve dvou prostředích. Charakterizuje vlastnosti rozhraní dvou optických prostředí.

Index lomu můžeme rovněž vyjádřit pomocí změny směru průniku paprsku prostředím dle Snellova zákona

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (20)$$

Při průchodu paprsku do jiného prostředí se paprsek láme v důsledku rozdílné rychlosti světla v obou prostředích. Úhel lomu β je menší než úhel dopadu α tehdy, když paprsek přechází do prostředí, ve kterém je proti původnímu prostředí rychlost světla nižší. Nastává tedy lom ke kolmici. V opačném případě nastává lom od kolmice. Úhly dopadu, odrazu i lomu se měří mezi paprskem a kolmicí spuštěnou na fázové rozhraní. Při refraktometrických měřeních se volí úhel dopadu 90° , takzvaný. klouzavý paprsek, a sleduje se maximální mezní úhel (mezní úhel lomu γ) – viz obrázek 2.



Obrázek 2: Lom světla na rozhraní dvou prostředí [9]

Hustota prostředí je odrazem kvalitativního i kvantitativního složení prostředí. Při průchodu paprsku z jednoho prostředí do druhého se mění jeho rychlost a směr šíření. Paprsek se tedy láme dle toho, jaký je poměr hustot obou prostředí. Pomocí indexu lomu můžeme identifikovat různé roztoky, nebo koncentrace roztoků. Platí totiž, že index lomu roztoku je závislý na koncentraci roztoku, takže měření indexu lomu lze využít jako kvantitativní analytickou metodu. Obecně platí, že stanovení koncentrací je tím citlivější a přesnější, čím více se jejich index lomu liší od indexu lomu čisté látky. Tato vlastnost se využívá například v lékařství pro zjištění obsahu bílkovin v séru, v automobilovém průmyslu pro určení koncentrace nemrznoucí směsi v ostřikovačích, nebo v potravinářství pro určení cukernatosti šťávy z hroznů, obsahu vody v medu či mléku a spoustě dalších aplikací.[9]

Tabulka 3: Index lomu různých materiálů

látka	n [-]
vakuum	1,00000
vzduch	1,00030
voda	1,33299
ethanol	1,36143
korundové sklo	1,50000
chlorid sodný	1,52000
sařír	1,77000
diamant	2,42000
benzen	1,50112
toluen	1,49693
propan	1,38556
butan	1,39930
glycerol	1,47460
aceton	1,35868

Hodnota indexu lomu závisí na několika faktorech. Jedním z nich je vlnová délka použitého světla. S rostoucí vlnovou délkou se jeho hodnota zmenšuje. Proto se světlo červené barvy láme méně než světlo barvy fialové. Tento jev nazýváme disperze světla. Zpravidla se ke každému indexu lomu indexem vpravo dole vyznačuje, při které vlnové délce světla byl změřen (například n_{445} při 445 nm). Hodnota indexu lomu je rovněž závislá na teplotě. U

kapalin index lomu klesá asi o 3 až $8 \cdot 10^{-4}$ jednotek při zvýšení teploty o 1 °C. Teplotní koeficient indexu lomu kapalin má tedy vysokou hodnotu. Co se týče tuhých látek, pak jsou změny indexu lomu s teplotou menší než u kapalin a přísluší jim nízká hodnota teplotního koeficientu. Teplota, při které byl index lomu látky změřen, se vyznačuje indexem vpravo nahoře, například n_{445}^{25} . V tabulkách se uvádí index lomu pro danou teplotu (například 25 °C) a vlnovou délku, obvykle pro dublet D sodíkové výbojky n_D^{25} , které odpovídá vlnová délka $589,3$ nm. Závislost hodnoty indexu lomu na tlaku je u pevných látek a kapalin nevýznamná. Význam má pouze u plynů, u nichž je třeba uvádět tlak, při němž je index lomu měřen. Takto změřený index lomu potom přepočítáváme na normální podmínky.[9]

3 Metody měření viskozity

3.1 Kapilární metoda

Měření viskozity je založeno na Poiseuillově rovnici pro průtok kapaliny kapilárou o poloměru r a délce l

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 \eta l}, \quad (21)$$

po vyjádření viskozity dostaneme

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 V l}, \quad (22)$$

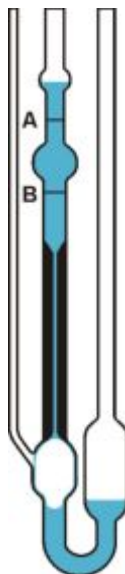
kde Δp je rozdíl tlaků, daný hydrostatickým tlakem kapaliny ve svislé kapiláře, který je úměrný hustotě kapaliny, V je objem kapaliny, který proteče kapilárou za čas t .

Viskozita je tedy úměrná hustotě kapaliny a době průtoku. Obvykle se provádí měření relativní, při němž se na stejném viskozimetru porovnává viskozita měřené kapaliny η se známou viskozitou srovnávací kapaliny η_{ref} .

$$\frac{\eta}{\eta_{ref}} = \frac{t}{t_{ref}} \frac{\rho}{\rho_{ref}}, \quad (23)$$

kde t , t_{ref} jsou doby průtoku určitého objemu měřené a srovnávací kapaliny, vymezené dvěma ryskami A a B, ρ a ρ_{ref} hustoty měřené a srovnávací kapaliny. Obrázek 3 ukazuje velmi často používaný Ubbelohdeův viskozimetr s visící hladinou.

Kapilární viskozimetry jsou přesné (0,01 až 0,1 %), avšak nemohou být použity pro nenewtonské kapaliny, neboť rychlostní gradient není konstantní – roste se vzdáleností od osy kapiláry.



Obrázek 3: Ubbelohdeův kapilární viskozimetr [3]

Pro výpočet kinematické viskozity se používá vztah

$$\nu = kt, \quad (24)$$

kde k je kalibrační konstanta přístroje určená měřením kapaliny známé viskozity η a známé hustoty ρ , t je doba průtoku kapaliny mezi ryskami A a B. Konstanta k je udána ve zkušebním listu používaného viskozimetru.

3.2 Metoda padající kuličky

Na tuhou kuličku padající ve viskózní kapalině působí tři síly. Je to tíha tělesa G , vztlaková síla F_{vz} a odporová hydrodynamická síla F_x . Pro malé rychlosti v lze odporovou hydrodynamickou sílu vyjádřit Stokesovým vzorcem

$$F_x = 6\pi\eta rv, \quad (25)$$

kde η je dynamická viskozita kapaliny, ve které se kulička pohybuje, a r je poloměr kuličky.

Tento vzorec platí pro pohyb kruhového tělesa v neohraničeném prostředí za předpokladu pomalé rychlosti tělesa – laminárním proudění. Platí pro rychlosti definované Reynoldsovým číslem $Re \ll 1$.

$$Re = \frac{2r\rho v}{\eta}, \quad (26)$$

kde r je poloměr kuličky, η je dynamická viskozita kapaliny, v je rychlost pohybu a ρ je hustota kapaliny.

Pro pád kuličky o poloměru r ve viskózním prostředí můžeme psát

$$\eta = \frac{2r^2 g(\rho_T - \rho)}{9v \left(1 - 2,4 \frac{r}{R}\right)}, \quad (27)$$

kde ρ_T je hustota kuličky, g je místní tíhové zrychlení a R je poloměr nádoby.

Častou variantou kuličkových viskozimetrů je viskozimetr Höpplerův na obrázku 4. Kulička se valí skleněnou trubicí o přesném vnitřním průměru, skloněnou v úhlu 10° , naplněnou měřenou kapalinou, obklopenou temperančním pláštěm. Měřicí válec je umístěn ve vnější válcové nádobě, kterou protéká voda z oběhového termostatu. Termostat umožňuje měření teplotní závislosti viskozity zkoumané kapaliny. Měřicí válec spolu s vnější temperovanou nádobou lze překlápět, aby bylo možno vrátit kuličku do startovní pozice před zahájením dalšího měření. Válec je na obou koncích uzavřen zátkou, z nichž jedna obsahuje kapiláru a malou nádržku. Pomocí této zátky jsou eliminovány nežádoucí změny tlaku ve zkoumané kapalině.

Měří se čas, potřebný k průchodu kuličky mezi horní ryskou A a spodní ryskou B. Obvykle se měří srovnávacím způsobem

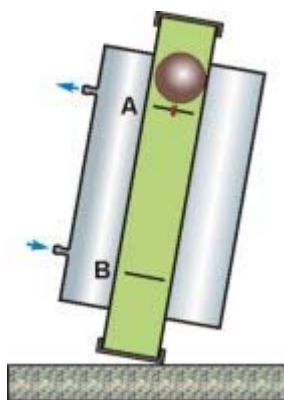
$$\frac{\eta}{\eta_{ref}} = \frac{t}{t_{ref}} \frac{\rho_T - \rho}{\rho_T - \rho_{ref}} = \frac{u_{ref}}{u} \frac{\rho_T - \rho}{\rho_T - \rho_{ref}}, \quad (28)$$

kde ρ_T je hustota kuličky

ρ a ρ_{ref} hustoty měřené a srovnávací kapaliny

u a u_{ref} rychlosti pádu kuličky,

t a t_{ref} doba průchodu kuličky mezi dvěma ryskami A a B, je-li trubice naplněna měřenou a standardní kapalinou.



Obrázek 4: Höpplerův viskozimetr [3]

Viskozimetr může být použit jen pro průhledné newtonské kapaliny.

Výběr kuličky se provádí podle viskozity zkoumané kapaliny na základě tabulky 4. Někdy je nutné použít dvě různé kuličky, abychom pokryli širší rozsah viskozity (např. měříme-li teplotní závislost viskozity). V tomto případě vhodíme do měřicího válce obě kuličky najednou, menší musí být vhozena jako první.

Tabulka 4: Parametry kuliček viskozimetru Haake [21]

materiál	m [g]	φ [gcm ⁻³]	r [mm]	K [mPa cm ⁻³ s ⁻¹]	η [mPa s]
sklo	4,61	2,229	15,81	0,019092	0,6 - 10
sklo	4,42	2,224	15,61	0,102500	7 - 130
ocel	16,12	8,125	15,59	0,114400	30 - 700
ocel	14,92	8,127	15,19	0,706100	200 - 4800
ocel	11,68	8,125	14,00	6,634000	800 - 10000
ocel	5,66	8,126	11,00	33,380000	6000 - 75000

Dynamická viskozita η se stanoví využitím vztahu

$$\eta = K(\rho_1 - \rho_2)t, \quad (29)$$

kde K je konstanta kuličky z tabulky 4, ρ_1 je hustota kuličky, ρ_2 je hustota zkoumané kapaliny a t je čas za který kulička urazí dráhu mezi ryskami.

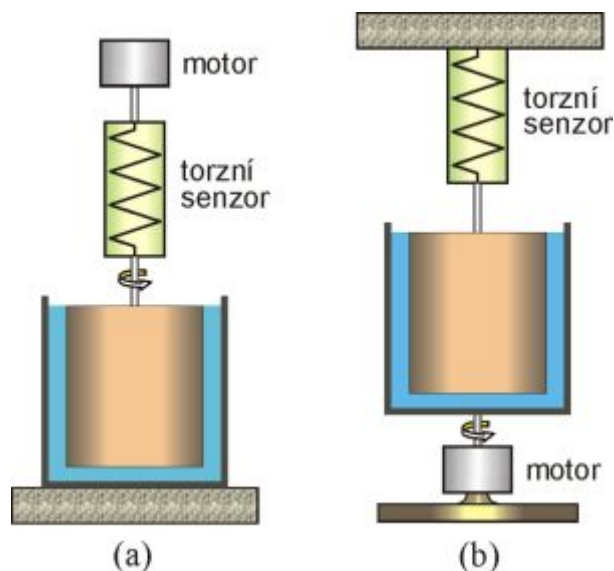
Je-li zkoumaná kapalina newtonovská, stanovená viskozita nezávisí na volbě kuličky. V případě neneutronovské kapaliny se může viskozita, kterou určíme měřením pomocí viskozimetru s padající kuličkou, lišit podle zvolené kuličky.

3.3 Rotační viskozimetry

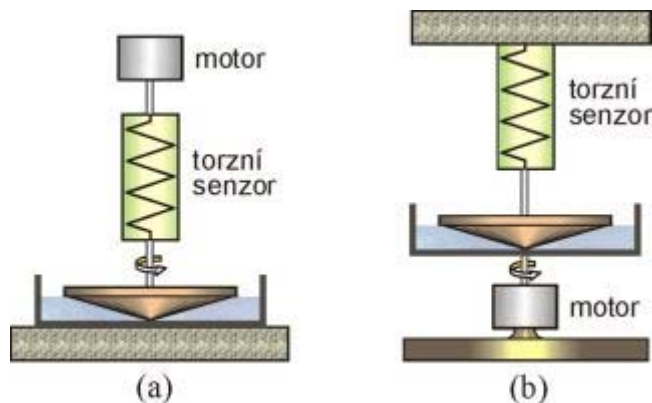
Rotační viskozimetry jsou založeny na měření torzní síly, kterou působí rotující kapalina na element zavěšený na torzním vlákně. Používají se pro analýzu reologicky složitých látek. Rotační viskozimetr sestává buď ze dvou soustředných válců, mezi nimiž je úzká mezera, vyplněná měřenou kapalinou (obrázek 5) nebo z kužele a desky (obrázek 6).

Jeden z elementů se otáčí konstantní úhlovou rychlostí, vnitřním třením kapaliny je otáčivý moment přenášen na druhý element, zavěšený na torzním vlákně. Po ustavení rovnováhy se měří úhel pootočení elementu od původní polohy φ , který je úměrný úhlové rychlosti ω a viskozitě kapaliny (K je konstanta přístroje):

$$\varphi = K\eta\omega . \quad (30)$$



Obrázek 5: Schéma rotačního viskozimetru se dvěma soustřednými válci [3]
 (a) Systém Couett s otáčivým vnitřním válcem
 (b) Systém Searle s otáčivým vnějším válcem

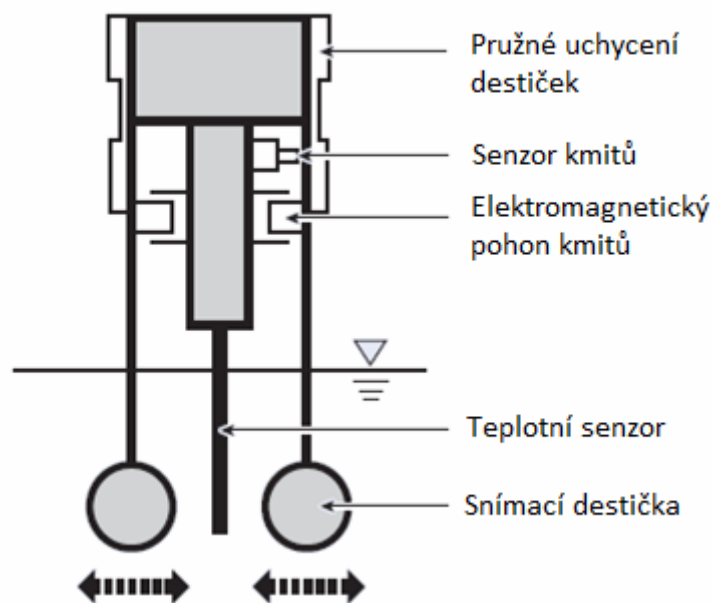


Obrázek 6: Schéma rotačního viskozimetru [3]
(a) Systém Couett s otáčivým kuželem
(b) Systém Searle s otáčivou deskou

Rotační viskozimetry jsou vhodné i ke studiu neneutonských kapalin, neboť umožňují měřit úhel pootočení (úměrný napětí) v závislosti na rychlosti otáčení (úměrná rychlosti deformace).

3.4 Vibrační metoda

Vibrační viskozimetry série měří viskozitu detekcí elektrického proudu nutného k rezonanci dvou snímacích destiček konstantní frekvencí 30Hz a amplitudě méně než 1mm. Tato nová metoda umožňuje vysokou přesnost a široký rozsah měření. Vzorky s velmi nízkou viskozitou i vzorky s velmi vysokou viskozitou mohou být měřeny bez nutnosti výměny snímacích destiček, čímž je zabezpečeno provedení velkého množství měření v řadě s odchylkou do 1 % v naměřených hodnotách. S viskozimetrem lze měřit neneutonské kapaliny, gely a koloidní roztoky (např. škrob), tekoucí vzorky (včetně tekutin v turbulentním toku), pěnivých a pěnových roztoků (nízká frekvence 30 Hz nezpůsobuje napěnění roztoku).



Obrázek 7: Schéma vibračního viskozimetru

Díky malému množství použitého vzorku, lze okamžitě měřit jeho teplotu, která je velmi málo ovlivněna snímacími destičkami, které jsou malé a lehké. Pomocí etalonu lze snadno provést jedno nebo dvoubodovou kalibraci. Standardní vybavení obsahuje připojení k PC přes rozhraní RS-232C (včetně spojovacího kabelu) a software pro sběr dat do počítače a jejich grafické zobrazení v reálném čase a provedení analýzy měření. Standardní nádobku na měření stačí naplnit těsně nad 35 ml, což přispívá k úspoře měřeného média. Snadná konstrukce umožňuje rychlé a jednoduché vyčištění destiček.

4 Metody měření optického lomu

4.1 Abbého refraktometr

Abbého refraktometr měří v širokém rozsahu indexu lomu (1,3 až 1,7). Má kompenzátor optické disperze, a proto lze pracovat s polychromatickým světelným zdrojem. Abbého refraktometrem se měří především index lomu kapalin. Lze však měřit také tuhé vzorky. Tuhý vzorek se přitiskne na plochu lámavého hranolu za použití kapaliny s vysokým indexem lomu.

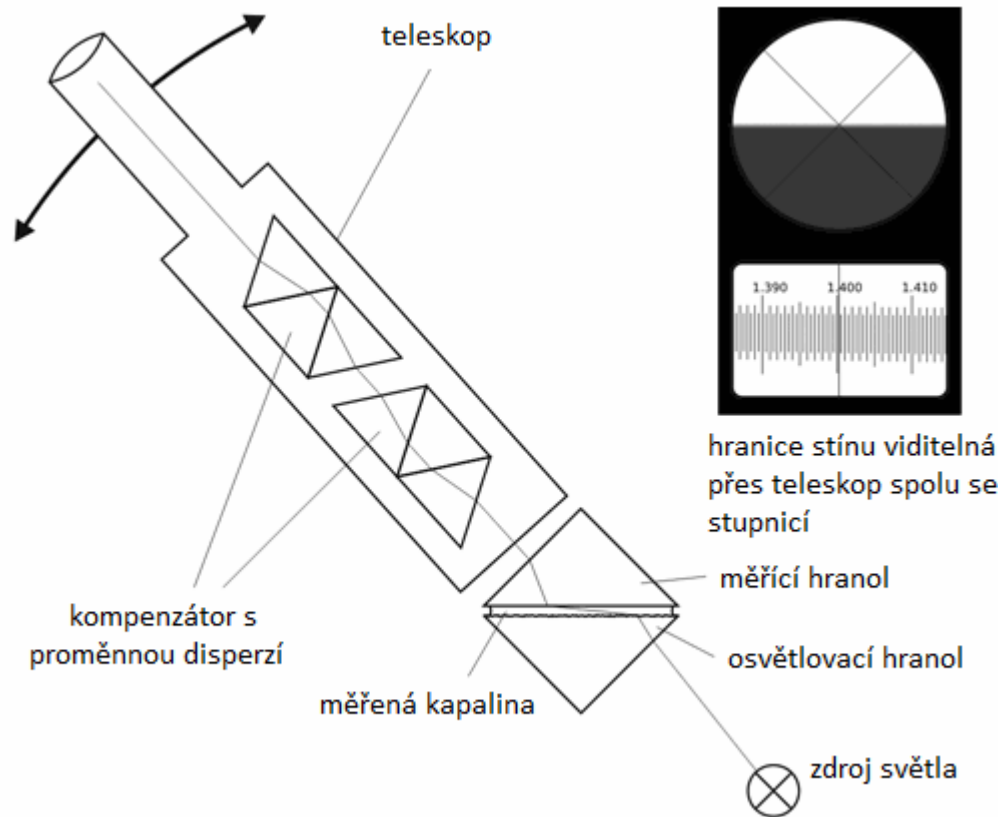


Obrázek 8: Abbého refraktometr [19]

Při refraktometrických měřeních se volí úhel dopadu o velikosti 90° , tzv. klouzavý paprsek a sleduje se maximální mezní úhel lomu. Jelikož je poměr vzduch – hranol konstantní, pak má pro nás význam poměr vzduch – vzorek. Všechny paprsky, jejichž úhel je větší než mezní úhel, se do prostředí s indexem lomu n_2 nedostanou, a tak vzniká rozhraní mezi světlem a tmou. Poloha rozhraní mezi světlou a tmavou oblastí tedy závisí na velikosti mezního úhlu a současně i na hodnotě indexu lomu kapalného vzorku. U roztoků, jejichž koncentrace se mění, dochází i ke změně indexu lomu. S rostoucí koncentrací se index lomu zpravidla zvětšuje a mění se tak poloha rozhraní, zvětšuje se tmavá oblast. U většiny refraktometrů dopadne svazek paprsků pod úhlem 90° na plochu lámavého hranolu, na kterou se nanáší malé množství analyzovaného kapalného vzorku. Na rozhraní vzorku a lámavého hranolu pak dojde k lomu paprsků.[19]

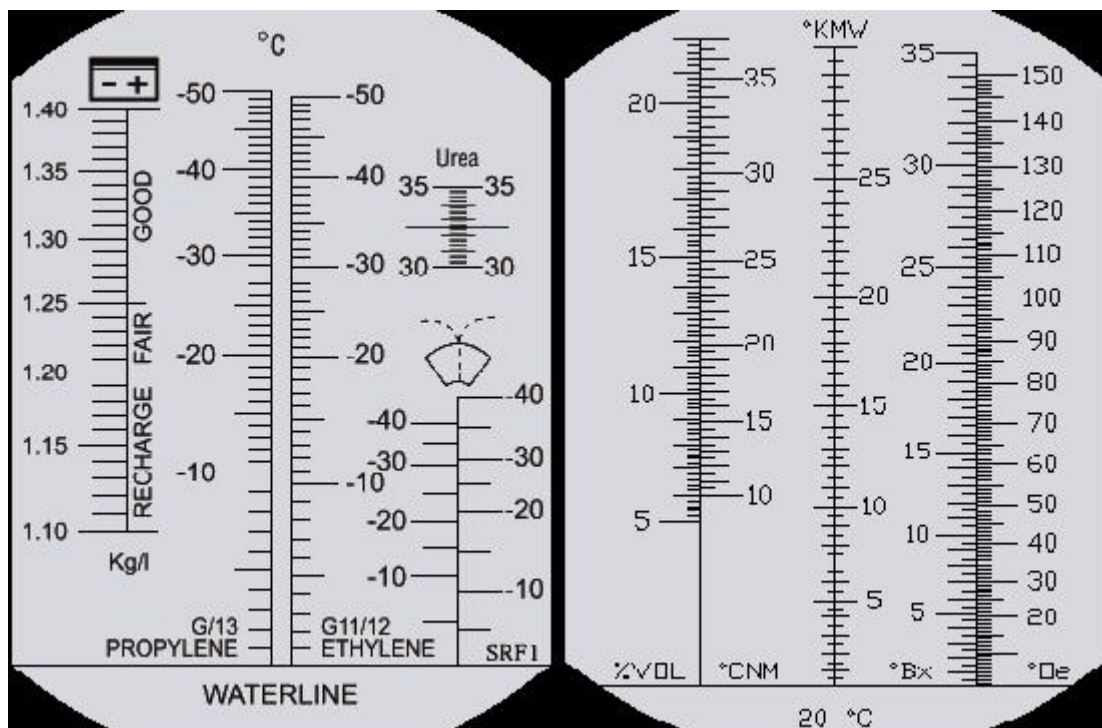
Zdrojem světla je polychromatické (bílé) světlo, které vyzařuje svazek paprsků, jež dopadá na vyleštěnou lámavou plochu lámavého hranolu. K měření malého množství kapalin slouží pomocný hranol, jehož matná plocha je přitisknuta k lámavé ploše lámavého hranolu. Oba hranoly jsou zasazeny do kovových plášťů, jimiž proudí kapalina, která je temperovaná termostatem. Toto je nutné vzhledem k tomu, že hodnota indexu lomu závisí na teplotě měřené látky. Teplota hranolu by se neměla v průběhu měření měnit o více než $\pm 1^\circ\text{C}$. Lomené a lomem rozložené paprsky polychromatického záření vstupují do teleskopu, v jehož

tubusu je umístěno kompenzační zařízení složené z Amiciho hranolů. Jeho hlavním úkolem je zrušení optické disperze měřené soustavy, tj. složení lomem rozloženého polychromatického záření. V zorném poli teleskopu je nitkovitý kříž, na jehož střed zaměřujeme světelné rozhraní jak lze vidět na obrázku 9 vpravo. Teleskop je spojen s pomocnou lupou zaostřenou na stupnici.[19]



Obrázek 9: Princip Abbého refraktometru [4]

Často jsou stupnice cejchovány přímo pro konkrétní kapaliny jak ukazuje obrázek 10. Na levém stupnici refraktometru můžeme vidět stupnici cejchovanou speciálně pro automobilový průmysl. Lze měřit stupeň nabití akumulátoru (stav elektrolytu olověného akumulátoru) a dále pak bod tuhnutí chladicí kapaliny a roztoku do ostřikovačů. Urea je stupnice pro měření kvality AdBlue (používaného pro redukci výfukových plynů spalovacích motorů). Na pravé stupnici je příklad pro potravinářský průmysl. Stupnice %VOL, na které lze odečíst přirozený (potenciální) obsah alkoholu ve šťávě z vinných hroznů. Dále Československý normalizovaný moštoměr °ČNM, Klosterneuburský moštoměr °KMW, Oechsleho moštoměr °Oe a univerzální stupnice Brix (% Mas Sacch).[4]



Obrázek 10: Stupnice dvou refraktometrů. [19]

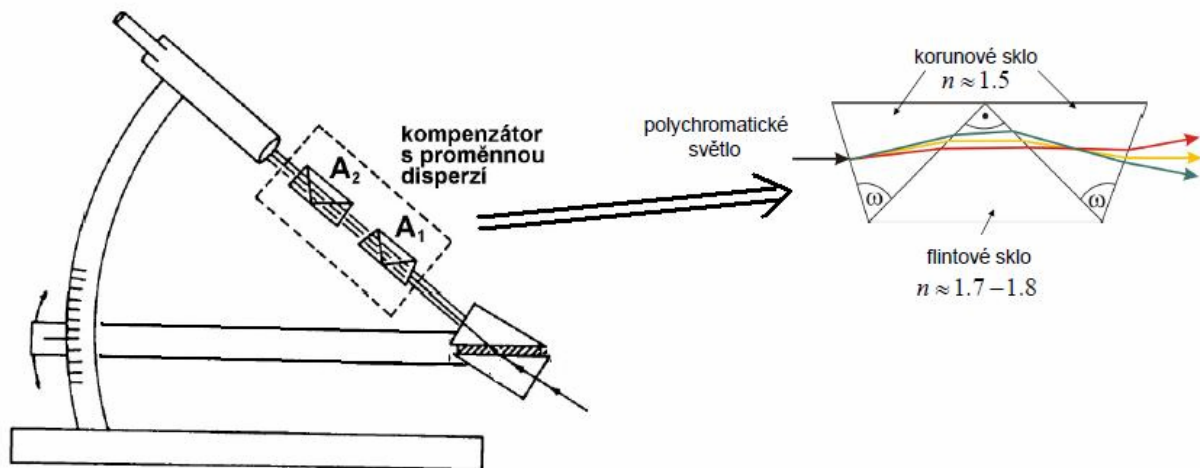
Abychom mohli používat pro měření bílé světlo, je potřeba použít kompenzátoru disperze. V opačném případě se použijí rtuťovou výbojku spolu s vodíkovými a heliovými Geisslerovými trubicemi a sadou monochromatizačních filtrů, které umožňují měřit index lomu při vlnových délkách uvedených v tabulce 5.[19]

Tabulka 5: Možné vlnové délky světla pro rtuťovou výbojku [21]

λ [nm]	Spektrum plynu
653,3	červená čára H α
587,6	žlutá čára He
546,1	zelená čára H γ
486,1	modrozelená čára H β
435,8	indigová čára H δ
404,7	fialová čára H ϵ

Kompenzátor disperze se skládá z flintového hranolu s lámavým úhlem 90°, k němuž jsou na obou stranách připojeny v obráceném směru dva hranoly z korunového skla. Jejich lámavé úhly ω volíme tak, aby odchylka paprsku o zvolené vlnové délce, způsobená hranolem z flintového skla, se právě rušila deviací způsobenou oběma hranoly z korunového skla, takže paprsek o vlnové délce λ_D vychází v původním směru. Pro paprsky z fialové oblasti spektra převládá deviace způsobená flintovým hranolem, takže se odchylují směrem od lámavé hrany flintového hranolu. Pro světlo, jehož vlnová délka spadá do červené oblasti, převládá deviace způsobená oběma hranoly z korunového skla se paprsky odchylují na opačnou stranu (z hranolu tedy vychází celé barevné spektrum). Umístíme-li Amiciho hranol za měřicí soustavu, jejíž disperze je stejně veliká ale opačného znaménka, dosáhneme toho, že paprsky budou opět rovnoběžné, čímž alespoň přibližně vykompenzujeme disperzi mezního úhlu a získáme v teleskopu ostré černobílé rozhraní. Zde ovšem kompenzujeme disperzi o konstantní hodnotě, můžeme tedy kompenzátor tohoto typu použít pro přístroje konstruované pro měření indexu lomu jednoho druhu látek.

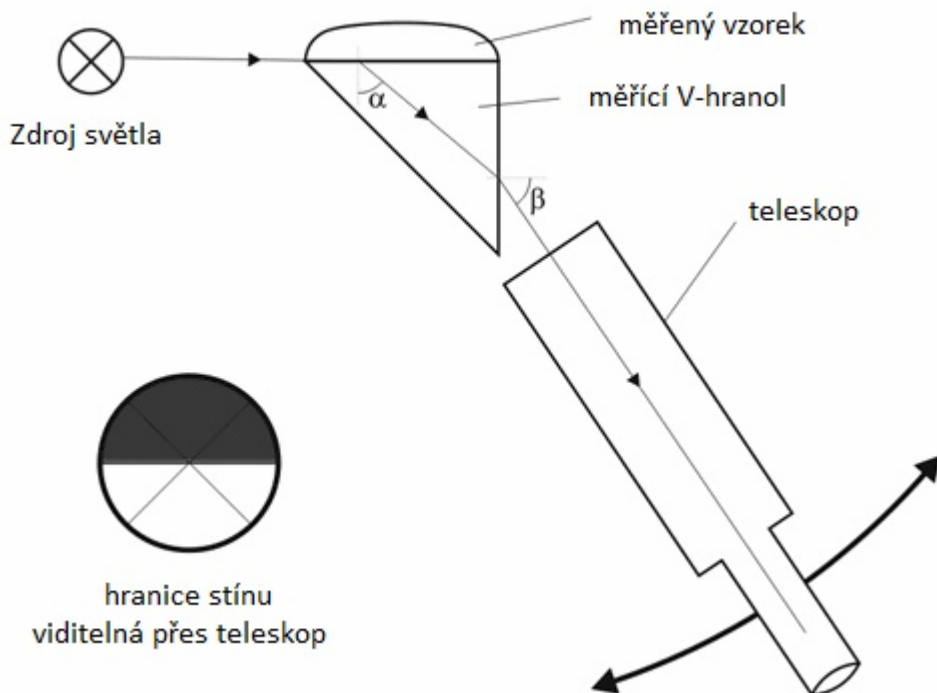
U univerzálních přístrojů používáme kompenzátor s proměnnou disperzí. Takovým kompenzátozem je například dvojice Amiciho přímohledných hranolů otočných vůči sobě okolo osy rovnoběžné se směrem dopadajícího monochromatického světla. Potom velikost odchylky paprsků závisí na úhlu vzájemného pootočení (v opačném smyslu) obou Amiciho přímohledných hranolů. [2]



Obrázek 11: Kompenzátor s proměnnou disperzí. [21]

4.2 Pulfrichův refraktometr

Pulfrichův refraktometr umožňuje měřit index lomu pevných látek. Svazek paprsků monochromatického světla ze zdroje je veden kondenzorem a kondenzorovou clonkou na lámavou plochu lámavého hranolu ve směru tečny (klouzává paprsek). Pro měření kapalin je na lámavý hranol přitmelena kruhová kyveta, jejímž dnem je lámavá plocha hranolu. Hranol je na straně přivrácené ke zdroji seříznut a seříznutím vzniklá ploška je zamatována. Tím se eliminuje rušivý vliv tmelu. Lomený svazek paprsků vychází z hranolu do vzduchu a do pozorovacího teleskopu. Teleskop je odchýlen o 90° proti směru paprsků vycházejících ze zdroje a upevněn na kotouči, kolem jehož osy se může otáčet. Zorné pole teleskopu je opatřeno nitkovým křížem a clonkou, zastiňující okrajové části zorného pole, ve kterých by se uplatnil rušivý vliv ohybových a interferenčních jevů při pozorování světelného rozhraní. Okulár teleskopu je ostřitelný podle potřeby pozorovatele. Stupnice je vynesena v kruhových stupních na obvodu kotouče. [21]

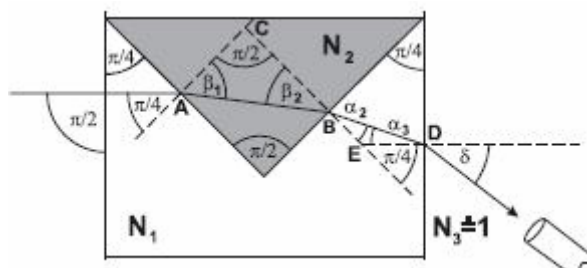


Obrázek 12: Princip Pulfrichova refraktometru [4]

4.3 Refraktometr s V-blokem

Nejdůležitější částí tohoto refraktometru je blok s dutinou ve tvaru V vyříznutou ve skleněném kvádru (index lomu N_1 , který musí být větší než N_2 měřené kapaliny). V praxi jsou často použity dva zkosené kvádry, lze je jednodušeji vyrobit. V literatuře se často tento refraktometr chybně uvádí jako Pulfrichův nebo Hilger-Chance. Není tomu tak, vyvinul jej J.V. Hughes v laboratořích Chance Brothers Ltd. v roce 1941.

Stěny dutiny jsou zdrsňeny a musí být navzájem kolmé tak, aby vytvořily lámavý úhel $\pi/2$. Dutinu naplníme zkoumaným vzorkem. Paprsek světla vnikne do vzorku a dvakrát se zlomí na stěnách pod úhlem $\pi/4$.



Obrázek 13: Princip měření indexu lomu pomocí V-bloku [20]

Pokud známe index lomu skla, můžeme lehce vypočítat index lomu zkoumané látky

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{\sqrt{2} \sin \beta_1} \quad (31)$$

Z trojúhelníku ABC můžeme odvodit

$$\beta_1 + \beta_2 = \frac{\pi}{2}. \quad (32)$$

Následně tudíž platí

$$\sin \beta_1 = \cos \beta_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \beta_1}. \quad (33)$$

Na druhé lámavé ploše má Schnellův zákon tvar

$$\frac{\sin \beta_2}{\cos \alpha_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (34)$$

Přičemž z trojúhelníku BDE platí vztah

$$\alpha_2 + \alpha_3 = \frac{\pi}{4}. \quad (35)$$

Můžeme tedy předcházející vztah upravit a dosadit do něj

$$\sin \beta_2 = \frac{N_1}{N_2} \sin\left(\frac{\pi}{4} - \alpha_3\right) = \frac{N_1}{\sqrt{2}N_2} (\cos \alpha_3 - \sin \alpha_3) = \frac{N_1}{\sqrt{2}N_2} \left(\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_3} - \sin \alpha_3\right). \quad (36)$$

Při výstupu paprsků z hranolu do vzduchu musí splňovat úhly dopadu a zákon lomu

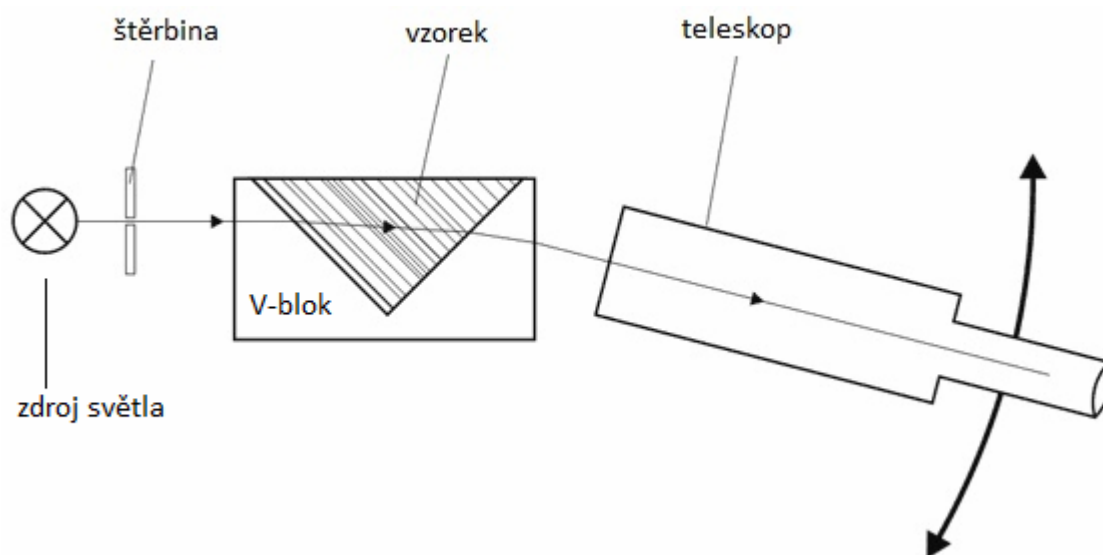
$$\frac{\sin \alpha_3}{\sin \delta} = \frac{1}{N_1}, \quad (37)$$

po dosazení do předešlých vztahů dostaneme

$$\sin \beta_2 = \frac{1}{\sqrt{2}N_2} \left(\sqrt{N_1^2 - \sin^2 \delta} - \sin \delta\right). \quad (38)$$

Po úpravách a následném dosazení do předešlých rovnic dostaneme vztah pro výpočet indexu lomu kapaliny N_2

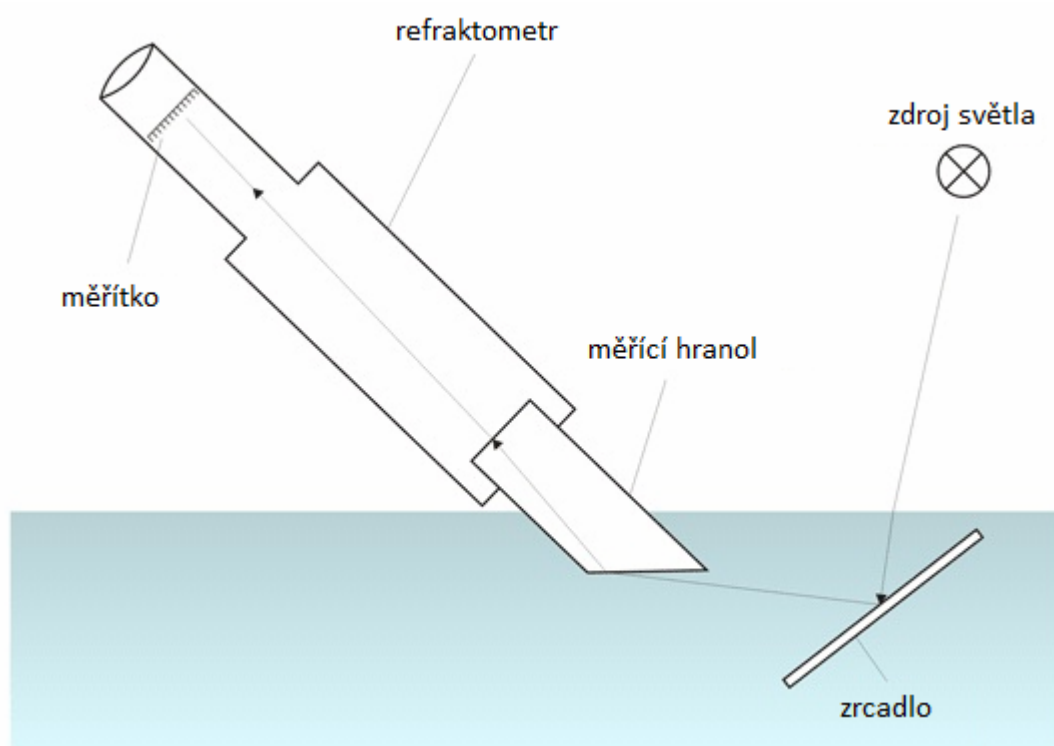
$$N_2 = \sqrt{N_1^2 - \sin \delta \sqrt{N_1^2 - \sin^2 \delta}}. \quad (39)$$



Obrázek 14: Princip refraktometru s V-blokem [4]

4.4 Ponorný refraktometr

Ponorný refraktometr patří do skupiny refraktometrů, u kterých lámavý hranol a teleskop vzájemně zaujmají neměnnou polohu. Schéma ponorného refraktometru je uvedeno na obrázku 15. Rozlišujeme dva typy ponorných refraktometrů, a to s nevyhříváním a s vyhříváním měrným hranolem. První typ je charakterizován volně nasazovatelným měrným hranolem, který se vkládá přímo do analyzovaného roztoku, jež je temperován ve vodním termostatu. Druhý typ je konstruován přímo na měření malého množství kapalin (analyzovaných vzorků).



Obrázek 15: Princip ponorného refraktometru [4]

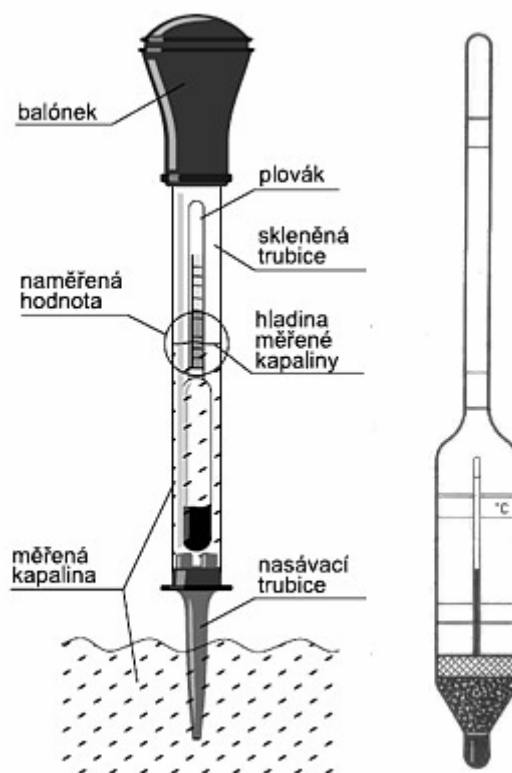
Paprsky polychromatického (bílého) světla dopadají přes analyzovaný vzorek umístěný ve skleněné kádince na lámavou plochu měřicího hranolu. Poté lomené a lomem rozložené paprsky dopadají na kompenzační zařízení realizované jedním Amiciho hranolem, který je otočný kolem vodorovné osy. U ponorného refraktometru na rozdíl od Abbého refraktometru postačuje ke kompenzaci optické disperze pouze jeden Amiciho hranol, protože pracuje v užším rozsahu indexu lomu. Z Amiciho hranolu vystupující paprsky dopadají na spojnou čočku a jí jsou poté vedeny do teleskopu, v jehož ohnisku je empirická stupnice posunovatelná mikrometrickým šroubem. V zorném poli pak okulárem pozorujeme světlé a tmavé pole, jejichž rozhraní je podmíněno velikostí mezního úhlu. Hodnotu indexu lomu následně určíme odečtením polohy světelného rozhraní v dílcích empirické stupnice a pomocí cejchovní tabulky pak dílky převedeme na index lomu. Jelikož je index lomu veličina závislá nejen na vlnové délce, ale i na teplotě, musí být měrný hranol i analyzovaný vzorek temperován v temperační nádobě a to tak dlouho, aby došlo k vyrovnání teplot. [4]

5 Metody měření hustoty

5.1 Hustoměry

Známe dva základní typy hustoměrů. Jeden se vkládá do nádoby, kde plave, a druhý nasaje balónek tekutinu do válce, kde plave malý hustoměr. První typ potřebuje větší množství kapaliny, ale často bývá cejchován v širším rozsahu.

Hustoměrem lze měřit i velice husté hmoty jako je například med.



Obrázek 16: Hustoměr s vnitřním plovákem a laboratorní hustoměr.[23], [10]

5.2 Hustota pomocí Archimédova zákona

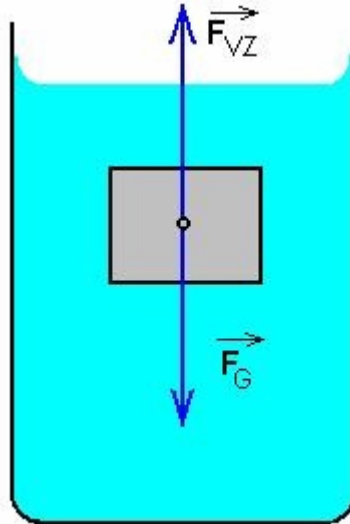
Touto metodou lze měřit hustotu pevných i kapalných látek. Je založena na metodě trojitěho vážení.

V našem případě zjišťujeme hustotu kapalin. Potřebujeme tudíž objekt s přesně známým objemem – plunžr. Plunžr je přesně definovaná skleněná baňka s vyznačeným objemem na závěsu.

Nejdříve zjistíme hmotnost plunžru ve vzduchu a následně ve zkoumané kapalině. Měření vychází z Archimédova zákona

$$F_{vz} = V \cdot \rho \cdot g = m \cdot g, \quad (40)$$

kde F_{vz} je vztlaková síla, V je objem tělesa, ρ je hustota kapaliny, g gravitační konstanta, m je hmotnost tekutiny, která má stejný objem jako ponořená část uvažovaného tělesa.



Obrázek 17: Vztlaková síla

V našem případě je m_1 hmotnost tělesa ve vzduchu a m_2 je hmotnost tělesa v měřené kapalině, pak vypočteme hustotu vzorku podle vzorce

$$\rho = \frac{m_1 - m_2}{V_{pl}} + d, \quad (41)$$

kde $m_1 - m_2$ je rozdíl hmotnosti plunžru ve vzduchu a kapalině, V_{pl} je objem plunžru a d je hustota vzduchu.

6 Výzkum ve světě

6.1 Viskozita transformátorových olejů při nízké teplotě

Tento článek popisuje studii viskozity na několika transformátorových olejích a ropných náhražkách, jako jsou silikonové kapaliny. Obě kinematické a dynamické viskozity byly měřeny v teplotním rozsahu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Za velmi nízké teploty bylo chování dynamické viskozity blízko kinematické viskozitě. Tato data jsou užitečná při výběru oleje pro aplikaci v chladném počasí. V článku jsou uvedeny oleje, které si zachovávají své vlastnosti i při nízkých teplotách. [17]

6.2 Čidlo viskozity automobilového motorového oleje

Pro hodnocení stavu automobilového motorového oleje je viskozita jedním z nejdůležitějších parametrů. Použitím mikrovlnných senzorů viskozity je možné provádět měření přímo v laboratoři na malých vzorcích oleje. Práce se zabývá chováním viskozity motorového oleje v závislosti na teplotě a výslednou interpretací dat z mikrovlnných čidel. Tyto úvahy jsou ilustrovány prostřednictvím výsledků měření získaných na použitých vzorcích oleje, které byly získány ze zkušebních vozů a čerstvého oleje v různých viskozitních třídách. Nakonec byla prokázána zvýšená viskozita v důsledku znečištění sazemí což rapidně zhoršilo kvalitu olejů a bylo doporučeno výrazně zkrátit intervaly výměny oleje a olejových filtrů. [8]

6.3 Vliv viskozity tekutin na tryskovém proudění

Viskozita kapaliny je velmi důležitým faktorem pro tryskové proudění, má významný vliv na objem a rychlost tekutiny tryskající z otvoru. Tato práce analyzuje sílu, kterou tekutina jak s nízkou tak vysokou viskozitou tryská z jehly. Situace je popsána vzorcem

$$\eta = Ae^{\frac{E}{RT}}, \quad (42)$$

kde η je viskozita kapaliny, A je viskózní konstanta, T je teplota, R je konstanta plynu a E je aktivační energie. Srovnává odpovídající rychlosti na základě kinetické energie kapaliny a střední rychlost proudění tekutiny za stavu s nízkou a vysokou viskozitou. Výsledky také odrážejí vliv viskozity kapaliny působící na tryskání kapaliny, a také ukazují, že jehla je při dlouhodobém měření stejně namáhána, působí-li kapalina s nízkou nebo vysokou viskozitou. Při vysoké viskozitě je kumulativní objem a střední rychlost proudění kapaliny menší než u viskozity nízké, ale jejich akreční proces je shodný. [24]

6.4 Dynamická objemová viskozita polyisobutylenu

Dynamická část modulu s vysokou molekulovou hmotností polyisobutylenu se vypočítá z naměřených hodnot podélné vlny a smykového modulu. Viskózní nebo energii pohlcující proces spojený s čistým objemem deformací se nachází při relaxačním procesu. Vrchol absorpce ve smyku a volně ložených součinitelů je zdánlivá aktivační energie spojená s oběma typy deformace. Jsou alespoň přibližně stejné, což naznačuje, že základní molekulární mechanizmy podílející se na dvou druzích deformace mohou být stejné. [12]

6.5 Viskozita v potravinářském průmyslu

Viskozita je důležitým parametrem v potravinářském průmyslu při zpracování tekutých potravin a jejich plnění do forem. Například při výrobě dvojbarevné čokolády musí být viskozita obou typů naprosto stejná, aby byl jasně zřetelný okraj a nebyla čokoláda jen směsicí obou druhů. Pro měření se používají kelímky s přesně definovaným otvorem a měří se jaké množství proteče za určený čas. Nádoba, do které jímáme čokoládu, je cejchována a my můžeme přímo odečítat viskozitu.



Obrázek 18: Čokoláda Milka Happy Cow [15]

Další oblastí potravinářského průmyslu, kde se využívá viskozita, je výroba zubní pasty. Naprosto stejná viskozita zaručí, že se barevné složky navzájem nepromíchají a my můžeme z tuby vytlačit krásnou trikolóru.

6.6 Releologická měření v potravinářském průmyslu

Měření indexu lomu se v potravinářském odvětví používá více než 100let. Zkoumá se čistota a koncentrace vstupních produktů při výrobě potravin. Důslednou kontrolou se dosahuje nejen vysoké kvality, ale také úspory finanční, protože cukr je jedna z nejdražších a nejpoužívanějších přísad. Pokud je index lomu jiný než je pro látku běžné, je na první pohled zřejmé, že je produkt pančovaný nebo ředěný vodou. Také je potřeba sledovat ochucovadla, barviva a další aditiva, která znehodnocují čistý produkt a tím snižují kvalitu potravin. To vše lze poznat refraktometrem.

Velice časté je použití refraktometru ve vinařství a spoustě dalších odvětví při sběru plodů, kde hraje množství cukru hlavní roli při fermentačním procesu. Vinaři pomocí indexu lomu hroznového vína měří jeho cukernatost. Podle toho poznají, kdy je nejlepší doba pro sběr a následné zpracování vína. Při výrobě piva se indexem lomu zjišťuje obsah cukru v mladině.

Další velice rozšířenou oblastí je včelařství. Včelaři kontrolou indexu lomu měří obsah vody v medu. Podle toho se mohou rozhodnout, jestli je med již vhodný ke stáčení.

Lze také použít měření indexu lomu při výrobě pálenky, kdy odečítáme přímo procentní obsah alkoholu v roztoku. Měří se slivovice, meruňkovice, broskvovice, whisky a bourbon. Také můžeme měřit domácí pálenky.

V neposlední řadě je možné měřit obsah vody a cukru v mléce.

Také při zpracování masa a sýrů můžeme touto metodou zjistit obsah soli v nálevu.

V Brazílii je hlavní palivo do spalovacích motorů bioethanol vyráběný z kukuřice. Jako ochranu proti ředění ethanolu vodou (ethanol dokáže navázat veliké množství vody) se používají refraktometry. Také pro určení, zda je kukuřice již zralá, se používá index lomu. Toto zaručí, že je sklizeň načasovaná přesně a tím se šetří náklady.

7 Laboratorní měření

Měření parametrů mléčných výrobků probíhalo při 24 °C, vzorky byly skladovány v ledničce a měly 18 °C. Nejdříve jsme změřili hustotu vzorků, abychom mohli přepočítat dynamickou viskozitu na kinematickou viskozitu.

Měření roztoků alkoholů probíhalo při 22 °C. Nejdříve byly vzorky zchlazeny na 0 °C a měřili jsme dynamickou viskozitu s postupným přirozeným oteplováním vzorků až na 23 °C. Dále jsme vzorky zahřáli na 70 °C a měřili jsme viskozitu při chladnutí roztoku k 23 °C. Následně jsme vzorky zmrazili na -40 °C a poté je nechali přirozeně ohřát na 0 °C. Mrazili jsme jen vzorky s koncentrací 50 % a více, protože ostatní by zmrzly.

Hustotu jsme měřili na váze se spodním závěsem s použitím přesného plunžru. Vzorky jsme znovu zchladili na -40 °C (roztoky 50 % a více) a 0 °C (roztoky 40 % a méně) a nechali je postupně ohřát na 70 °C pomocí termostatu.

Index lomu jsme měřili pro vzorky 0 %, 50 % a 100 % v teplotním rozsahu 23 °C až 70 °C. Použili jsme termostat a postupně jsme vzorky zahřívali.

7.1 Vzorky mléčných výrobků

Použili jsme několik vzorků mléčných výrobků a změřili jsme jejich viskozitu.

- Polotučné mléko 1, 1,5 % tuku, Moravia Lacto a.s., Jihlava
- Polotučné mléko 2, 1,5 % tuku, Mlékarna Pragolactos a.s., Praha
- Smetana do kávy, 10 % tuku, Campina
- Smetana, 12 % tuku, Mlékarna Kunín a.s., Kunín
- Smetana, 31 % tuku, Mlékarna Kunín a.s., Kunín

7.2 Vzorky roztoků destilované vody a ethanolu

Namíchali jsme roztok destilované vody a ethanolu v poměrech 0 % až 100 % po deseti procentech. V tabulce 7 jsou hodnoty vypočteného a reálného hmotnostního poměru roztoků.

Pro roztoky jsme použili Absolutní Ethylalkohol p.a., C₂H₆O, společnosti Penta se šarží 180810 a s následujícím složením:

Tabulka 6: Obsah Absolutního ethylalkoholu

látka	obsah [%]
Ethanol	99.90000
Methanol	0.00300
Aldehydy	0.00190
Vyšší alkoholy	0.00070
Volné kyseliny	0.00180
Fural	0.00010
Netěkavé látky	0.00110

Roztoky jsme připravili podle objemového poměru 0 % až 100 % ethanolu v destilované vodě. Aby byl poměr co nejpřesnější vypočetli jsme hmotnosti jednotlivých složek a následně kapaliny odvážíli na váze Radwag XA310. Podařilo se nám dosáhnout téměř přesné poměry. Pro dávkování malého množství ethanolu do vody jsme použili pipetu.

Tabulka 7: Hmotnostní poměr ethanolu a destilované vody

Roztok [%]	Vypočtené hodnoty				Reálné hodnoty				
	V _e [ml]	V _v [ml]	m _e [g]	m _v [g]	V _e [ml]	V _v [ml]	m _e [g]	m _v [g]	Roztok [%]
0	0	200	0,00	199,60	0,00	199,60	0,00	200,00	0,00
10	20	180	15,78	179,64	15,75	179,63	19,96	179,99	9,98
20	40	160	31,56	159,68	31,59	159,67	40,04	159,99	20,02
30	60	140	47,34	139,72	47,36	139,77	60,03	140,05	30,00
40	80	120	63,12	119,76	63,65	119,74	80,67	119,98	40,20
50	100	100	78,90	99,80	78,86	99,85	99,95	100,05	49,97
60	120	80	94,68	79,84	94,65	79,84	119,96	80,00	59,99
70	140	60	110,46	59,88	110,45	59,88	139,99	60,00	70,00
80	160	40	126,24	39,92	126,77	39,91	160,67	39,99	80,07
90	180	20	142,02	19,96	142,12	19,98	180,13	20,02	90,00
100	200	0	157,80	0,00	157,80	0,00	200,00	0,00	100,00

7.3 Vzorky alkoholických nápojů

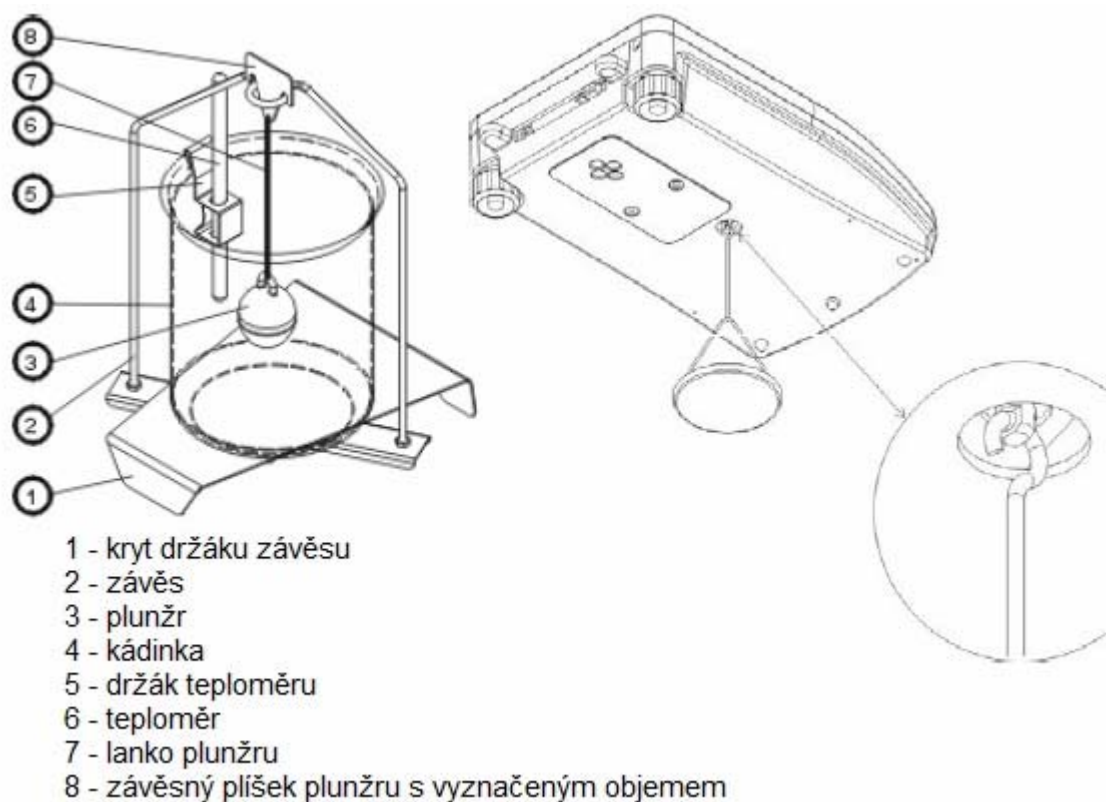
- Božkov vodka, 37,5 %, Stock Plzeň-Božkov s.r.o.
- Fernet Stock, 40 %, Stock Plzeň-Božkov s.r.o.
- Moravská Švestka, 40 %, Rudolf Jelínek a.s.
- Vodka 42, 42 %, Granete a.s.
- Amundsen Cherry, 16%, Stock Plzeň -Božkov s.r.o.
- Key-rum Caribbean white, 37,5 %, Stock Plzeň-Božkov s.r.o.
- Hruška, 40 %, Vanapo, s.r.o.
- Rulandské bílé 2008, 12 %, Vinařství Vyskočil
- Tequila Reposado Jose Cuervo Especial, 43 %, Jose Cuervo No. 73
- Cinzano bianco, 14,4 %, DCM S.P.A.
- Neznámý alkohol 1 – domácí pálenka
- Neznámý alkohol 2– domácí pálenka

7.4 Hustota

Hustotu jsme měřili na laboratorních vahách Radwag XA 310/X. Jsou to velice přesné laboratorní váhy, měří až po rozlišení v desetínách miligramu a umožňují měřit také hustotu kapalin pomocí plunžru zavěšeného na ramenu váhy nebo na dolním závěsu.



Obrázek 19: Váha Radwag XA 310/X [18]

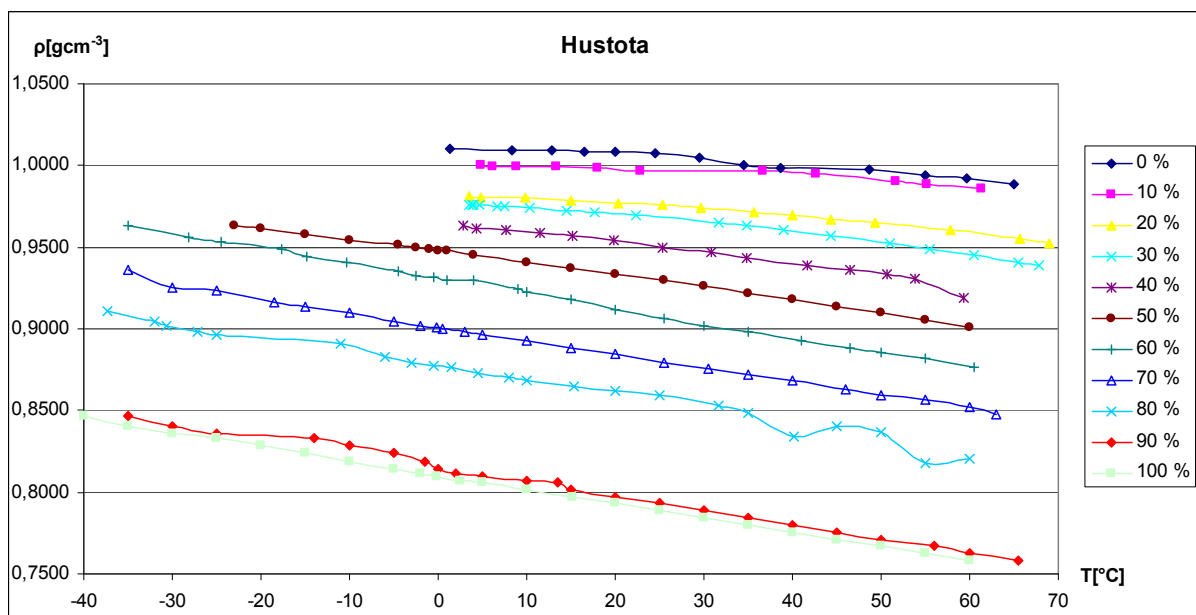


Obrázek 20: Možnosti zavěšení plunžru na váze Radwag XA 310/X [18]

Dle návodu je nutné ponořit horní hranu plunžru do hloubky 15mm pod hladinu. Těleso ponořené do kapaliny je nadlehčováno vztlakovou silou F_{VZ} , která má opačný směr než tíhová síla F_G . Velikost vztlakové síly je ovlivňována objemem ponořené části, hustotou kapaliny a tíhovým zrychlením. Tato síla není ovlivňována hloubkou ponoru, objemem kapaliny ani hustotou plunžru. Objem kalibrovaného plunžru je $10,0180 \text{ cm}^3$. Několikrát jsme plunžr zvážili a poté vypočetli jeho hustotu. Hustota plunžru je $2,48 \text{ gcm}^{-3}$, je tudíž splněna podmínka, aby měl plunžr větší hustotu než měřené kapaliny. V našem případě mají hustotu okolo 1 gcm^{-3} . Plunžr nesmí plavat ani plovat.

Pro kontrolu jsme změřili i vodu z vodovodu.

Nejdříve bylo nutné roztoky zchladit na $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ (roztoky 50 % a více) a $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (roztoky 40 % a méně) a nechali je postupně ohřát na $70 \text{ }^\circ\text{C}$ pomocí termostatu. Hodnoty z váhy jsme odečetli ručně. Bylo nutné váhu neustále hlídat, protože váha často spouští kalibraci a tím přerušila měření. Hodnoty před a po kalibraci při stejné teplotě se neshodovaly. Proto bylo nutné kalibraci vždy přerušit. Váha spustí kalibraci pokaždé, když se změní teplota mechanismu o 2°C , pohne se s váhou nebo každých 5minut. Všechny tyto kalibrace lze stornovat, avšak nejpozději každých 30minut se provede kalibrace, kterou stornovat nelze. [18]



Graf 1: Hustota roztoků v rozsahu teplot $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ až $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

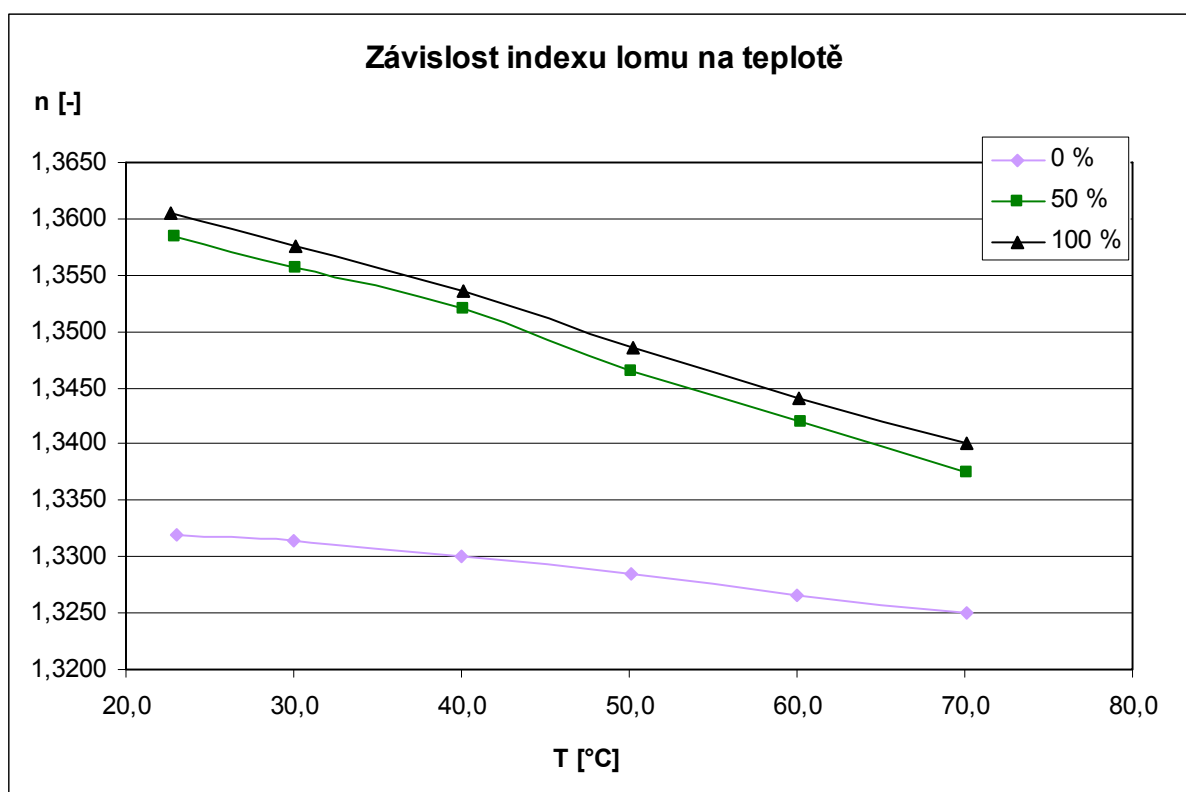
Z grafu 1 je jasně patrné, že největší hustotu má voda a nejnižší čistý ethanol. Tudíž je možné použít měření hustoty jako metodu pro zjištění koncentrace alkoholu v roztoku. Na tomto principu jsou založeny takzvané hustoměry, neboli argeometry, kdy se ponoří skleněná baňka do roztoku a na vyčnívající stopce ukazuje hladina roztoku přímo hustotu roztoku. Tato stopka může být přímo cejchována v procentech alkoholu, cukernatosti nebo jiné koncentraci. Nejznámější hustoměry v praxi jsou pro automobilový průmysl. Měří se jimi například stav nemrznoucích směsí nebo koncentrace elektrolytu baterie, podle které můžeme určit stav nabití.

7.5 Index lomu

Měření indexu lomu probíhalo na Abbého refraktometru z obrázku 8. Ten byl připojen k termostatu a postupně jsme zvyšovali teplotu a odečítali index lomu. Vždy bylo nutné počkat 10 minut, aby se proudící kapalina dostatečně prohřála a následně zahřála refraktometr na požadovanou teplotu.

Index lomu jsme měřili v rozsahu teplot 23 °C až 70 °C pro roztoky 0 %, 50 % a 100 %.

V grafu 2 lze vidět, že s rostoucí koncentrací ethanolu ve vodě roste také index lomu. Proto lze tuto metodu použít pro měření koncentrací. V praxi se také často používá. Na trhu je velká spousta refraktometrů ať už univerzálních tak i specializovaných, cejchovaných rovnou v koncentracích cukru, soli, nebo jiných látek v roztoku.



Graf 2: Index lomu v rozsahu teplot 23 °C až 70 °C.

7.6 Viskozita

Měření probíhalo na vibračním viskozimetru A&D SV-10 s měřicím rozsahem 0,3 - 10000 mPa s a umožňuje opakovatelnost měření s odchylkou do 1 %. Viskozita je silně závislá na teplotě a proto přístroj obsahuje čidlo pro měření okamžité teploty. Malá teplotní kapacita měřících destiček a malého vzorku dopomůže k rychlejšímu ustálení teploty v celém objemu vzorku během velmi krátké doby. Přístroj umožňuje měřit například proudící kapaliny, koloidní roztoky, rosolovité vzorky a dokonce pěnové vzorky, protože metoda nepění vzorky.



Obrázek 19: Viskozimetr A&D SV-10 [1]

Viskozimetr umožňuje nepřetržité měření, není nutné během měření měnit snímací destičky. Přístroj obsahuje dvě 24k zlaté destičky. Elektromagnetický pohon vibruje destičkami se sinusovou vlnou a zpětnou fází podobně jako u ladičky hudebních nástrojů. Elektrický proud je snímán jako veličina vznikající mezi snímacími destičkami a měřeným vzorkem. Přístroj měří dynamickou viskozitu.

Přístroj je potřeba pravidelně kalibrovat. Jsou zde tři možnosti kalibrace. Jednoduchá kalibrace vodou, jednobodová kalibrace standardním vzorkem se známými parametry a dvoubodová kalibrace se dvěma standardními vzorky.

Měření se dá automatizovat propojením viskozimetru s COM portem počítače a hodnoty odečítat za pomoci programu VEE Pro.

Pro přepočítání dynamické viskozity na kinematickou použijeme vzorec

$$v = \eta \rho^{-1}, \quad (43)$$

kde v je kinematická viskozita, η je dynamická viskozita a ρ je hustota kapaliny.

Tabulka 7: Viskozita vody, mléka a smetany

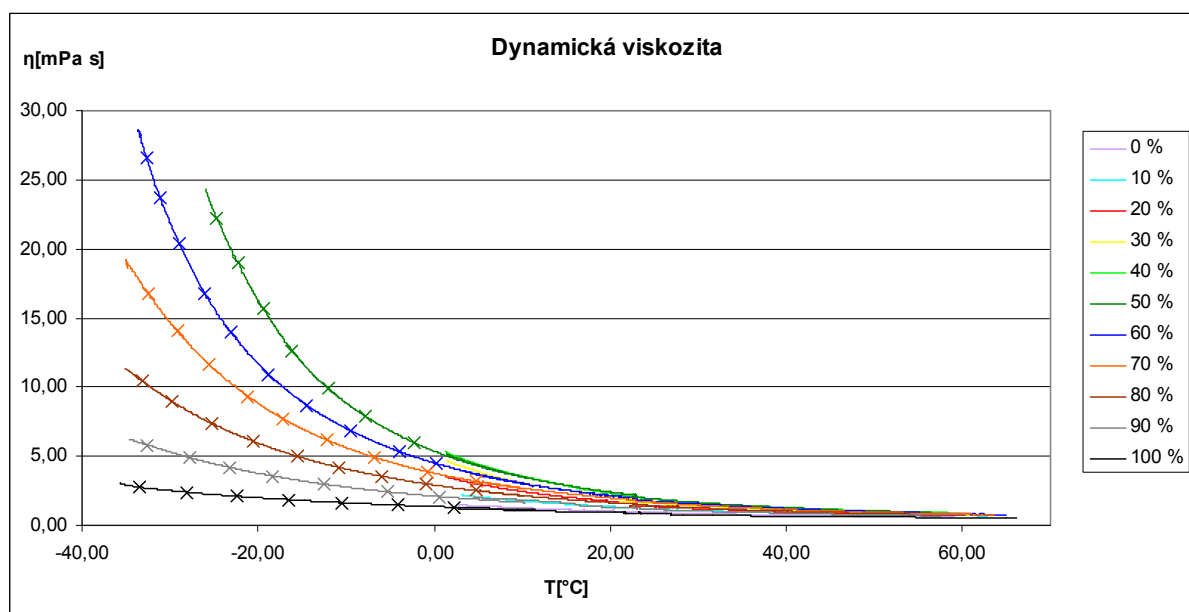
	Voda z vodovodu	Polutučné mléko 1	Polutučné mléko 2	Smetana 12 %	Smetana 31 %
m1 [g]	24.8570	24.8574	24.8564	24.8562	24.8558
m2 [g]	14.8893	14.5090	14.4956	14.6244	14.8055
V [cm ³]	10.0180	10.0180	10.0180	10.0180	10.0180
ρ [gcm ⁻³]	0.9970	1.0320	1.0332	1.0203	1.0022
η [mPa s ⁻¹]	0.8400	1.6200	1.7300	2.7300	11.6700
ν [mm ² s ⁻¹]	0.8425	1.5698	1.6744	2.6757	11.6444

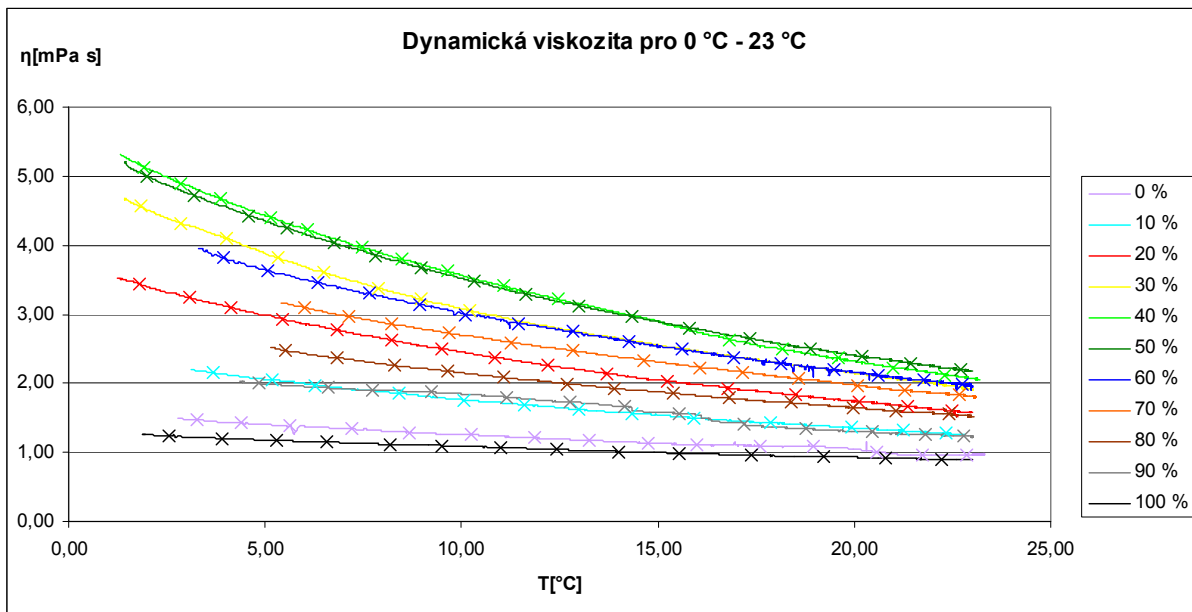
Z tabulky 7 vyplývá, že viskozita roste s rostoucím obsahem tuku. Obsah tuku je nepřímo úměrný obsahu vody v mléčném výrobku. Tudíž je tato metoda vhodná pro měření obsahu tuku nebo vody v látce.

Mléka, která mají stejné deklarované množství tuku a také stejnou teplotu mají lehce rozdílnou viskozitu. To může být způsobeno tím, že hodnota tuku byla uvedena jako minimální.

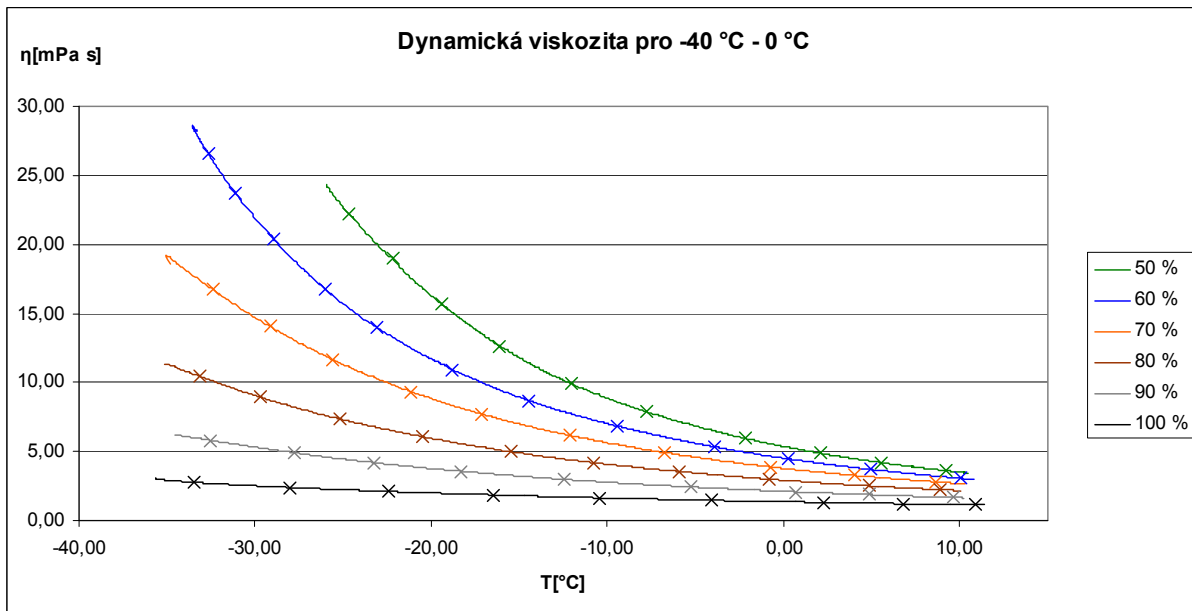
V praxi se měření viskozity mléčných výrobků nepoužívá. Je jednodušší změřit hustotu nebo index lomu. Také hustoměry a refraktometry jsou řádově levnější, přenosné a jednodušší na obsluhu, kdy nepotřebujete složité zařízení, ale stačí ruční refraktometr nebo malý hustoměr, který může pracovník nosit vždy v kapse.

V následujících grafech jsou vždy zobrazeny celé křivky dynamické a kinematické viskozity v rozsahu teplot -40 °C až 70 °C pro roztoky 50 % až 100 % a 0 °C až 70 °C pro roztoky 0 % až 40 %. Poté jsou pro větší přehlednost uvedeny jednotlivé grafy rozdělené na jednotlivé teplotní průběhy.

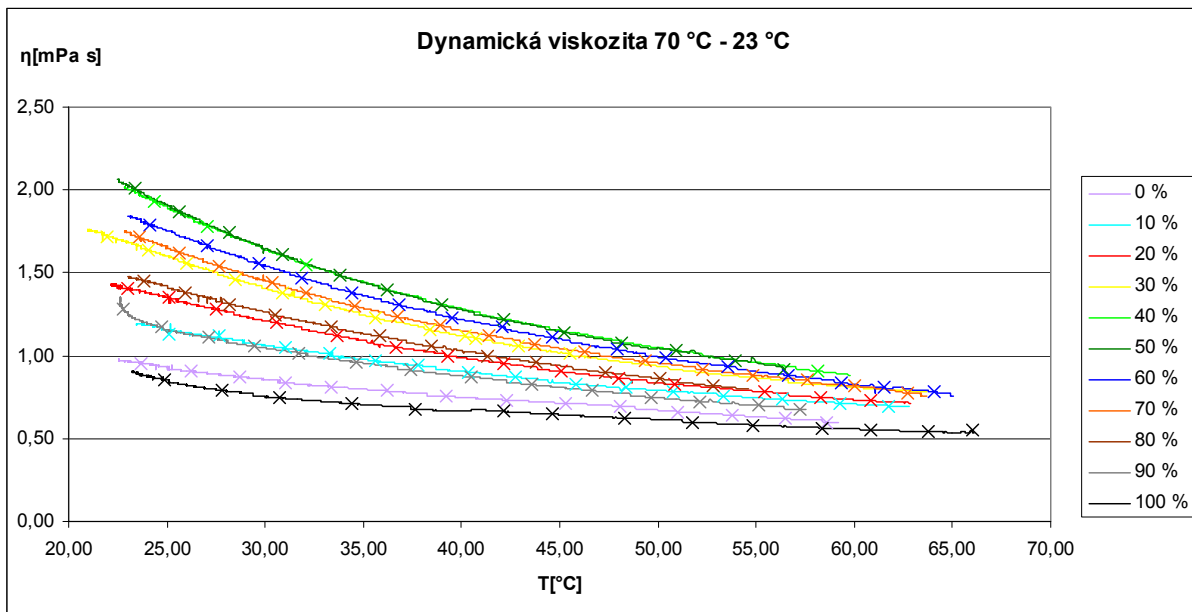
**Graf 3: Dynamická viskozita v rozsahu teplot -40 °C až 70 °C.**



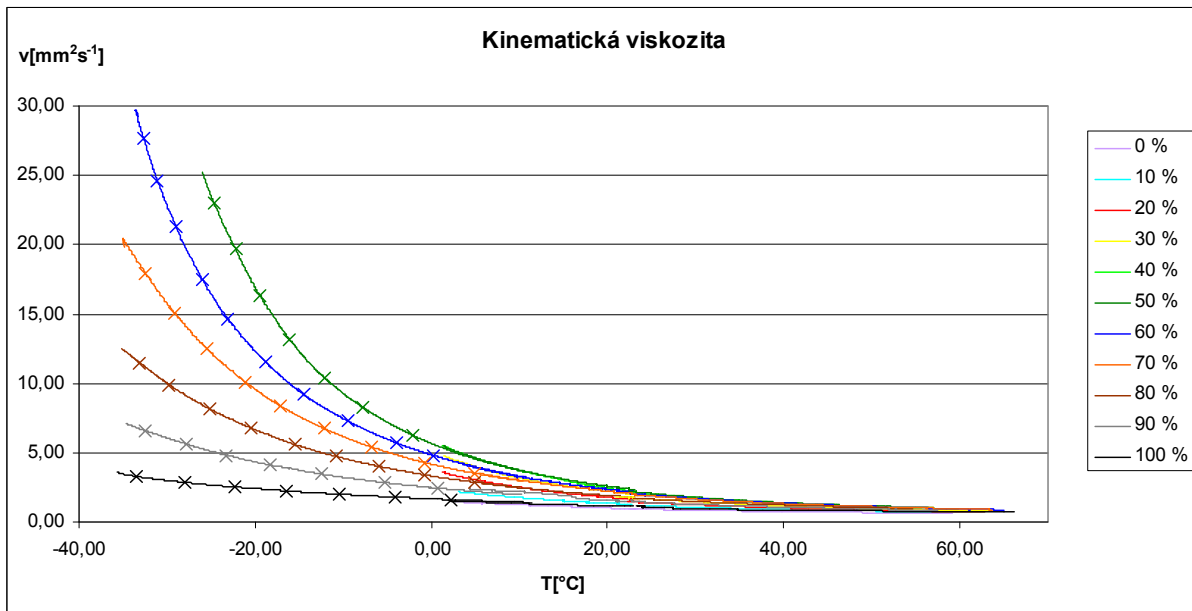
Graf 4: Dynamická viskozita v rozsahu teplot 0 °C až 23 °C.



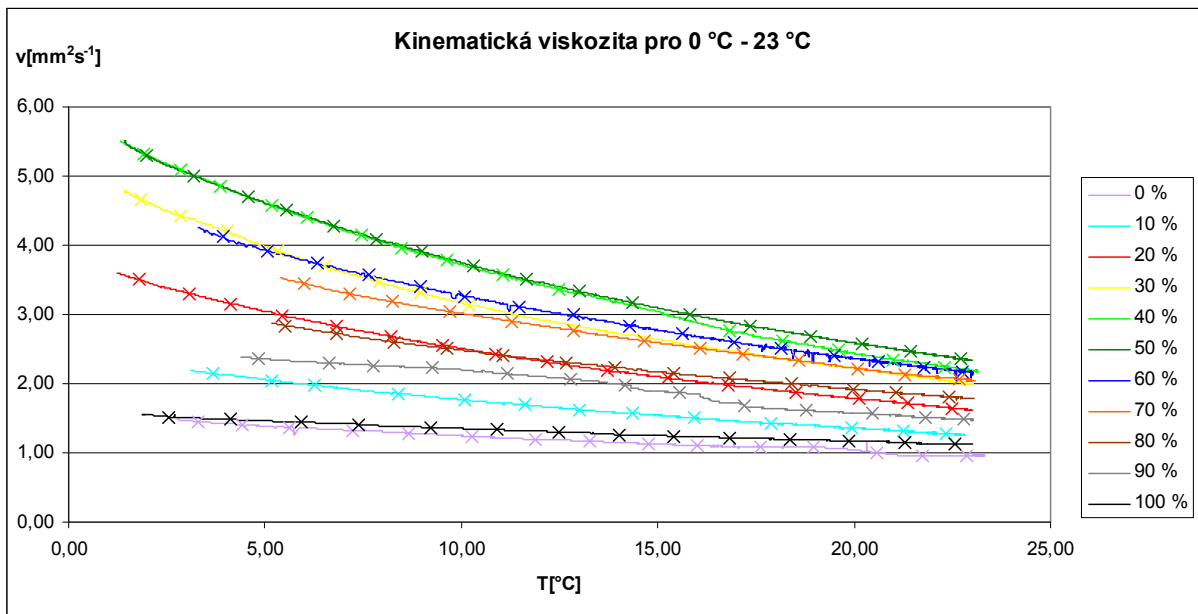
Graf 5: Dynamická viskozita v rozsahu teplot -40 °C až 0 °C.



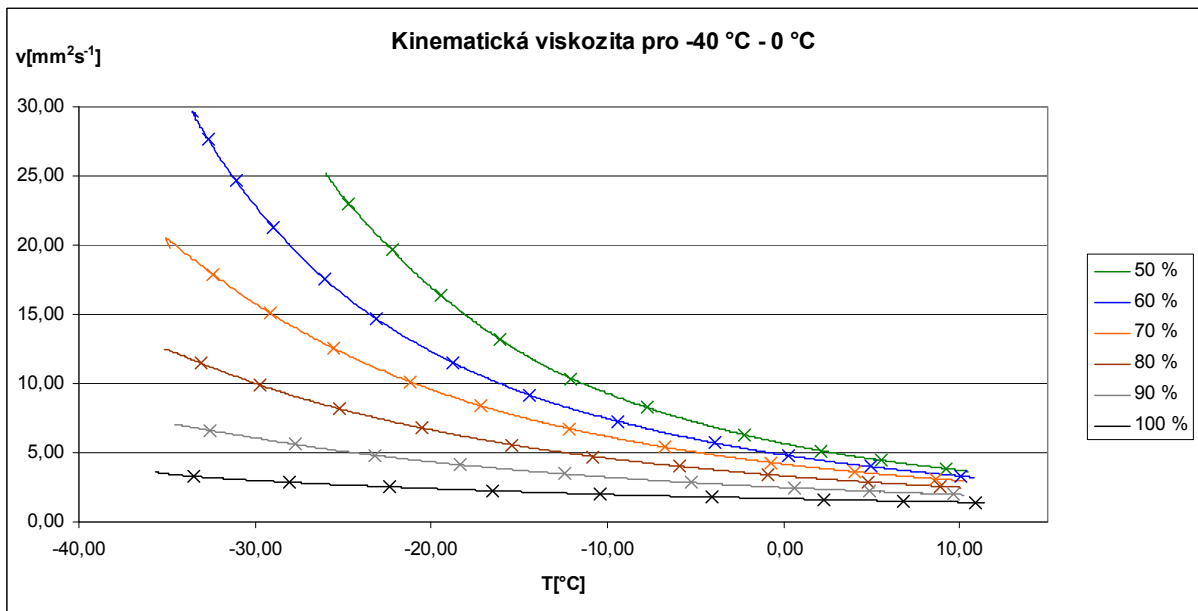
Graf 6: Dynamická viskozita v rozsahu teplot 70 °C až 23 °C.



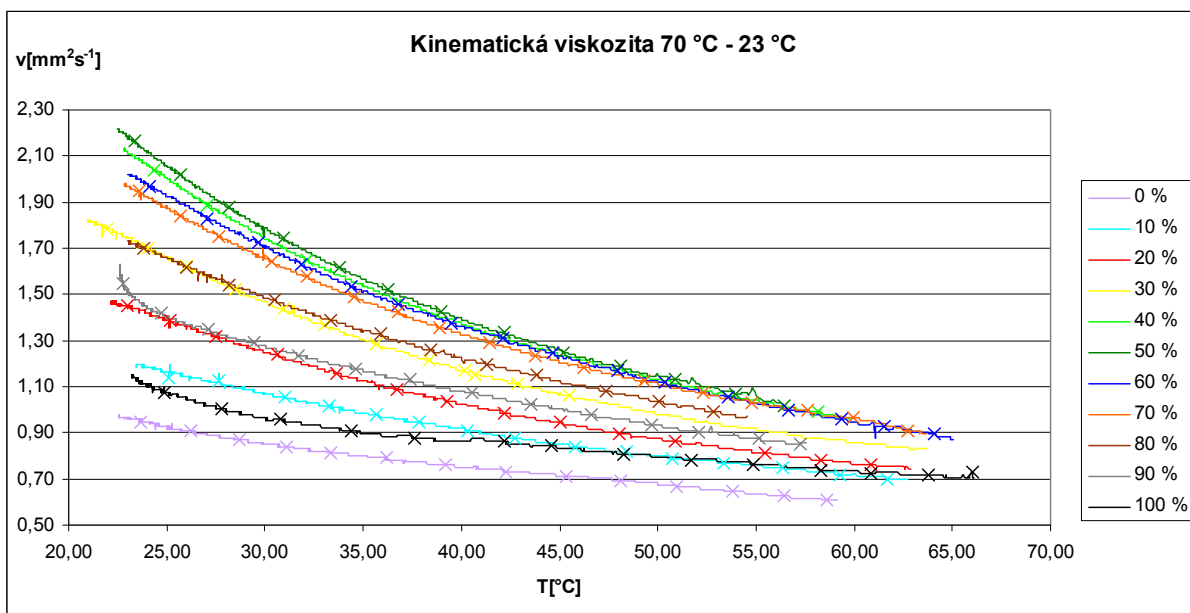
Graf 7: Kinematická viskozita v rozsahu teplot -40 °C až 23 °C.



Graf 8: Kinematická viskozita v rozsahu teplot 0 °C až 23 °C.



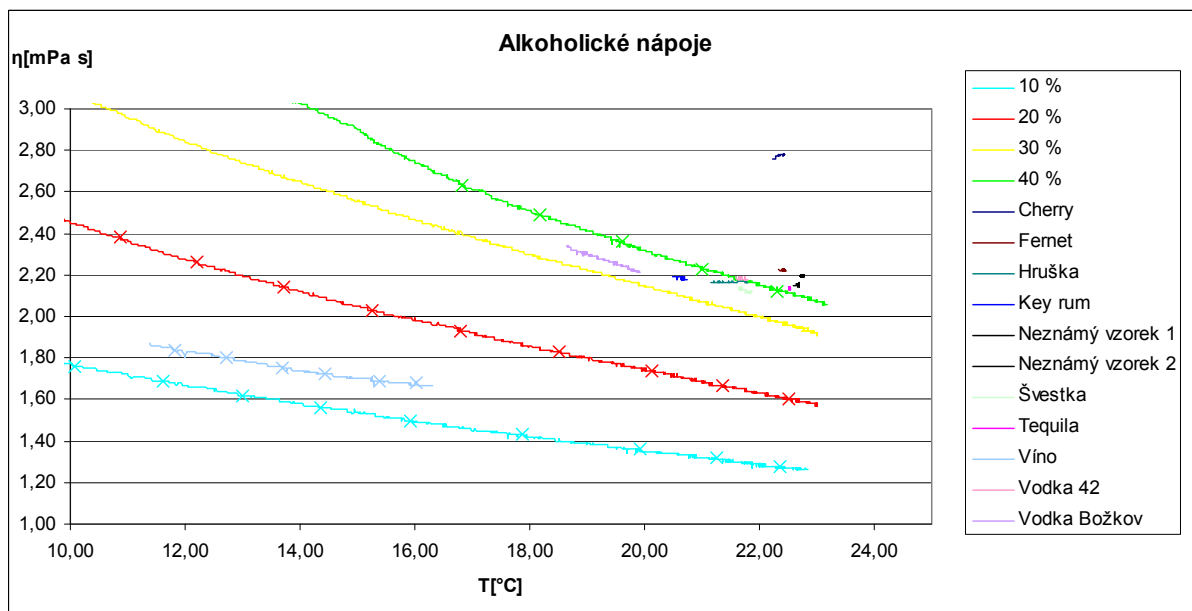
Graf 9: Kinematická viskozita v rozsahu teplot -40 °C až 0 °C.



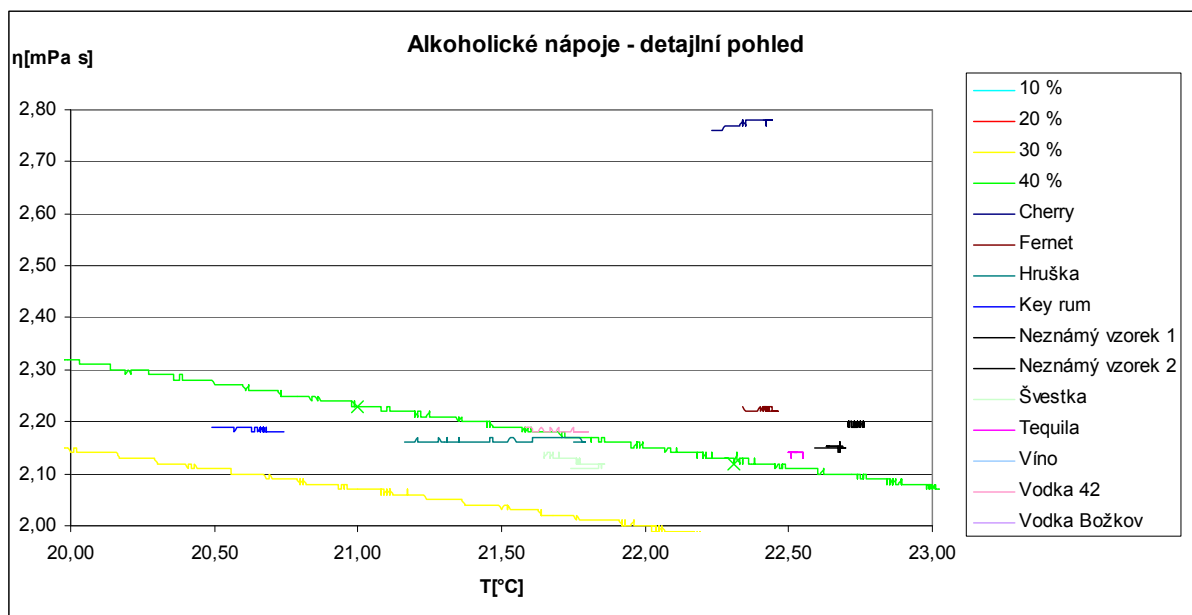
Graf 10: Kinematická viskozita v rozsahu teplot 70 °C až 23 °C.

Z grafů 3 až 10 vyplývá, že dynamická i kinematická viskozita s koncentrací ethanolu ve vodě roste až do koncentrace 50 %, pak začíná znovu klesat. Proto není metoda měření viskozity vhodná pro měření koncentrace tohoto roztoku. Viskozita vzorku 100 % - čistého ethanolu a 0 % - destilované vody se téměř shodují v celém rozsahu teplot.

V posledním kroku jsme změřili několik alkoholických nápojů a snažili jsme se odhadnout jejich obsah alkoholu.



Graf 11: Odhad koncentrace alkoholu v alkoholickém nápoji.



Graf 12: Odhad koncentrace alkoholu v alkoholickém nápoji – detail.

Jak lze vidět z grafu 11 a detailního pohledu grafu 12 tak se většina vzorků pohybuje kolem čtyřicetiprocentní hranice. Víno je těsně nad 10 %. Všechny vzorky tudíž přibližně odpovídají údajům z etikety. Pouze Cherry nebylo možné touto metodou změřit, protože je to velice hustý alkoholický nápoj a více než koncentrace alkoholu v roztoku hrály roli rozpuštěné látky, s největší pravděpodobností ovocné koncentráty.

8 Závěr

V diplomové práci jsme zkoumali možnosti měření koncentrací kapalin v potravinářském průmyslu. Metody měření hustoty, viskozity a indexu lomu jsme podrobně probrali a zhodnotili jejich přínos a použitelnost v praxi.

Všechna měření roztoků ethanolu s vodou probíhaly do 70 °C, protože teplota varu ethanolu při běžném tlaku vzduchu je 78,3 °C, tudíž by nám z roztoku vyprchal. Dále jsme museli omezit měření vzorků 0 % až 40 % pouze do 0 °C, protože by zmrzly. Vzorky 50 % až 100 % jsme mohli měřit do -40 °C. Čistý ethanol mrzne při -114,4 °C.

Index lomu a hustota jsou často používané pro kvalitativní a kvantitativní měření v praxi. Jsou to jednoduché metody zkoumání kapalin. Pořizovací cena zařízení není vysoká a proto jsou i velice rozšířené. Napomáhají tomu sami výrobci, kteří na stupnici vyznačují přímo koncentrace podle určení hustoměru. Proto není nutné hledat v tabulkách, nebo přepočítávat hodnoty. Hustoměr a refraktometr patří do výbavy každého pracovníka kontrolujícího výrobní proces, kvalitu surovin a koncentrace roztoků.

Viskozita nemůže sloužit pro kvantitativní měření roztoků alkoholů. Nejen proto, že je silně ovlivněna příměsemi, ale také se viskozita pro různé koncentrace téměř shodují. V našem případě jsou téměř shodné viskozity destilované vody a čistého ethanolu, což tuto metodu kvantitativního měření přímo vylučuje.

Naopak pro kvantitativní měření mléčných výrobků viskozitu použít lze. Je totiž dána poměrem tuků a vody. Čím více tuku mléčný produkt obsahuje, tím méně je v něm vody. Proto je výrobek viskóznější. Naopak jeho hustota klesá. Viskozita vzrostla o jeden řád, ale hustota klesala jen nepatrně, proto je z měření viskozity lépe poznat obsah tuků.

V praxi se však využívá určení viskozity pro plnění forem, nebo pro oddělení různě barvených potravin v jedné formě a dosažení tak větší vizuální přitažlivosti produktu pro zákazníka. Setkat se s tímto lze například u vícebarevných čokolád, lízátek, bonbónů, ale i zubní pasty.

Z grafů a tabulek je jasně patrné, že dynamická a kinematická viskozity jsou téměř stejné, jen posunutě o tři řády. Je to způsobeno tím, že hustota všech vzorků je téměř přibližně 1 g cm^{-3} .

V praktické části diplomové práce jsme narazili na několik překvapivých zjištění. Například voda při 18 °C začne uvolňovat rozpuštěné plyny. V nádobce se začnou objevovat malé bublinky, které silně ovlivní měření dynamické viskozity. Demineralizovaná voda vytváří malé okem téměř nepostřehnutelné bublinky. Voda z vodovodu však vytváří jasně pozorovatelné bublinky. V obou případech viskozita prudce rostla a znehodnotila měření. Pokud se s nádobkou zatřásl tak, aby všechny bublinky vyprchaly, vrátili se hodnoty dynamické viskozity do správných hodnot. Pokud však byl do vody přidán ethanol, tak tyto bublinky nevznikaly.

Ethanol je velice dobrý odmašťovač, proto od koncentrace 70 % a výše nebylo možné použít injekční stříkačku. Píst se ve válci nechtěl pohybovat a bylo nutné vyvinout daleko větší sílu. To však mělo za výsledek poskočení pístu a prudké vystříknutí obsahu z válce. Proto jsme stříkačku nepoužili a roztoky opatrně přelávali.

9 Seznam literatury

- [1] A&D, Company Limited, Uživatelský manuál SV-10, Japan
- [2] BAKULE R, BROŽ J, Molekulová fyzika (skriptum) UK, Praha 1982
- [3] BARTOVSKÁ L, ŠIŠKOVÁ M, Co je co v povrchové a koloidní chemii - výkladový slovník. VŠCHT Praha, 229 s. Praha
- [4] BORKOWSKI M, BPP, databáze refraktometrů dostupná na adrese <http://www.refractometer.pl>
- [5] BROŽ J. a kol.: Základy fyzikálních měření I. SPN, Praha 1967
- [6] BROŽ J. a kol.: Základy fyzikálních měření I. SPN, Praha 1983
- [7] HORÁK Z, KRUPKA F, Fyzika, SNTL, Praha 1981
- [8] JAKOBY, B., Senzor automobilových olejů, Dept. of Ind. Sensor Syst., Vienna Univ. of Technol., Austria, 2003, dostupný na adrese http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=1234892
- [9] JANČÁŘOVÁ, I., JANČÁŘ, L.: Analytická chemie. 1. vyd. Brno : Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2003. 195 s. ISBN 80-7157-647-6.
- [10] Labor-Komplet s.r.o., výrobce a prodejce laboratorních potřeb, dostupný na adrese <http://www.laboratorni-potreby.cz/areometry-na-lih/laboratorni-hustomer-na-lih--i/>
- [11] MARVIN, ROBERT S., ALDRICH, R., SACK, H. S., Dynamická viskozita polyisobutylenu, National Bureau of Standards, Washington, D. C., 1954, dostupné na adrese http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5120619
- [12] Odborný server dostupný na adrese <http://physics.info/viscosity/>
- [13] Odborný server dostupný na adrese www.IEEE.com
- [14] Odborný server dostupný na adrese www.sciencedirect.com
- [15] Odborný server dostupný na adrese www.science-projects.com/Viscosity.htm
- [16] Odborný server zabývající se čokoládou dostupný na adrese <http://www.chocolatemission.net>
- [17] Oommen, T.V., Viskozita transformátorových olejů při nízké teplotě, Inst. of Transmission Technol., ABB Power T&D Co.Inc., 1995, dostupné na adrese http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=482348
- [18] Radwag.com, Uživatelský manuál, Poland
- [19] REINBERK F, internetový obchod dostupný na adrese <http://www.refraktometr.cz>
- [20] SMITH C, Refraktometry v potravinářském průmyslu, Reichert, Inc., dostupný na adrese <http://www.fishersci.com>
- [21] Studijní materiály fyzikálního praktika Matematicko-fyzikální fakulty UK, dostupné na adrese <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>
- [22] SVATOŠ V, AUTOMAX, internetový obchod dostupný na adrese <http://www.automaxhk.cz/hustomer-akumulatoru-1148.html>
- [23] VEIS Š, MAĐAR J, MARTIŠOVITŠ V, Mechanika a molekulová fyzika, ALFA, Bratislava, 1981
- [24] YANWEI L, Vliv viskozity na proudové proudění kapalin, Coll. of Mech. & Electr. Eng., Central South Univ. of China, 2007, dostupné na adrese http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4283609